

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİTES DİŞLİ ÇELİĞİNİN
KRTD-BOR YÖNTEMİ İLE BORLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alaaddin Cem OK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**VİTES DİŞLİ ÇELİĞİNİN
KRTD-BOR YÖNTEMİ İLE BORLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Alaaddin Cem OK
(506151201)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güldem KARTAL ŞİRELİ

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506151201 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alaaddin Cem OK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “VİTES DİŞLİ ÇELİĞİNİN KRDT-BOR YÖNTEMİ İLE BORLANMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Güldem KARTAL ŞİRELİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Servet TİMUR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan ORHAN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **04 Haziran 2018**





Bilim Uğruna Hayatını Kaybedenler'e,



ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, sahip olduğu bilgi birikimi ve mesleki tecrübesini büyük bir sabır ve özveri ile benimle paylaşan, mühendis gibi düşünmenin inceliklerini öğretmek karşılaştığım sorunlara yol gösteren, hiçbir desteğini esirgemeyen, çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Güldem KARTAL ŞİRELİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

İyi bir mühendis olabilmek için öncelikle dürüst ve ahlaklı bir insan olmamızın gerekliliğini her daim vurgulayan, karşılaştığımız her bilgiyi sorgulamamızı öğütleyen, engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle ufkumuzu geliştirerek farklı düşünmemizi sağlayan sayın hocam Prof. Dr. Servet Timur'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanaklarını kullanmama izin veren hocalarım Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e, Prof. Dr. Hüseyin Çimenoglu'na ve Prof. Dr. Lütfi ÖVEÇOĞLU'na, kimyasal analizler için Nihal CEBBAR'a numunelerimin karakterizasyonlarını gerçekleştirmemi sağlayan Sevgin TÜRKELİ'ye ve Hüseyin Sezer'e, aşınma testlerini gerçekleştirmeme yardımcı olan Araş. Gör. Erkan KAÇAR'a, deneysel tecrübelerini benimle paylaşan Araş. Gör. Çağatay YELKARASI'na teşekkür ederim.

Çalışma gruplarına ilk girdiğim andan itibaren beni güler yüzle karşılayan, başım her sıkıştıgımda yanımda olan ve her konuda bana destek olan Met. Yük. Müh. Yasin KILIÇ'a, Araş. Gör. Levent KARTAL'a, Dr. Ayşe KILIÇ'a, Met. Yük. Müh. Cevahir DURMAZ'a ve Met. Yük. Müh. Candeniz UYSAL'a teşekkür ederim.

40219 proje kapsamında İTÜ BAP birimine ve 2016-31-07-15-004 no'lu proje kapsamında BOREN'e tezime sağladıkları destekten ötürü teşekkür ediyorum.

Lisans ve yüksek lisansta çalışma arkadaşlığımızın yanı sıra, her konuda dertleşebildiğim kadim dostum Met. Müh. Burak Zeren'e, yüksek lisans hayatımın bana kazandırdığı sevgili arkadaşlarım Met. Müh. Çağatay ÜSTÜN'e Met. Yük. Müh. Arif OĞUZ'a, Met. Yük. Müh. Aslı Su Bora'ya, Met. Müh. Yusuf Umut KURT'a, Burak AYDIN'a ve Met. Müh. Oğuz Kağan COŞKUN'a teşekkür ediyor arkadaşlıklarımızın hiç bitmemesini diliyorum.

Berber gece yarısına kadar okulda kalıp, birlikte tezlerimizi yazarken, yeri geldiğinde ağlayarak yeri geldiğinde gülerken bilgisayarları kapattığımız, sevgili arkadaşım Met. Müh. Büşra ÇETİN'e tez yazma süresince bana yoldaş olmasından ötürü teşekkür ediyor, tezini bitirme süresince başarılar, sabırlar ve kolaylıklar diliyorum.

Doğduğum günden itibaren doğru ve dürüst bir birey olmayı öğreten annem Fatma OK'a, araştırmaya ve bilime olan merakımın temellerini atan babam Hüseyin Tuncel OK'a, hiçbir koşulda benden destek ve sevgilerini esirgemedikleri için minnettarım.

Haziran 2018

Alaaddin Cem OK
(Metalurji ve Malzeme Müh.)

Bu tez çalışması kapsamında tüm deneyler şahsım tarafımdan yapılmış olup, verilen referanslar dışında, herhangi bir kaynaktan direkt veya indirekt alıntı yapılmamıştır.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1 Otomobillerde Kullanılan Dişliler.....	3
2.1.1 Vites dişlileri	5
2.1.1.1 Vites dişlilerinde meydana gelen hasarlar.....	6
2.1.1.2 Vites dişlilerine uygulanan yüzey işlemleri	10
2.2 Metallerin Borlanması.....	10
2.2.1 Çelik üzerinde büyütülen FeB ve Fe ₂ B tabakalarının karakteristiği.....	11
2.3 Borlama Yöntemleri	12
2.3.1 Katodik redüksiyon termal difüzyon ile borlama (KRTD-Bor).....	13
3. KONU HAKKINDA DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	17
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
4.1 KRTD-Bor Yöntemi ile Vites Dişlilerinin Borlanması ve Karakterizasyonu..	26
4.1.1 Akım yoğunluğunun etkisi.....	26
4.1.2 Elektroliz süresinin etkisi.....	29
4.1.3 Elektroliz sıcaklığının Etkisi.....	32
4.1.4 KRTD-Bor ile vites dişli çeliği üzerinde tek fazlı borür tabakası büyütülmesi	35
4.1.4.1 950 °C’de gerçekleştirilen KRTD-Bor deneyleri.....	35
4.1.4.2 1000 °C’de gerçekleştirilen KRTD-Bor deneyleri.....	40
4.2 Aşınma Test Sonuçları	46
5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	53
KAYNAKLAR	57
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63



KISALTMALAR

KRTD-Bor: Katodik Redüksiyon Termal Difüzyon Yöntemiyle Borlama
CRTD-Bor: Cathodic Reduction and Thermal Diffusion Based Boriding Process
XRD: X-Işınları Difraksiyonu
SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu
HV: Vickers Sertliği
AISI: American Iron and Steel Institute
FH: Faz Homojenleştirme



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Yaygın olarak kullanılan dişlilerin eksenlerine göre sınıflandırılması [4]	3
Çizelge 2.2: Taşıtlarda kullanılan dişli türleri ve AISI çelik standartları [4].....	5
Çizelge 2.3: Dişlilerde meydana gelen temel hasarlar [4].....	7
Çizelge 2.4: Borlamanın avantajları ve dezavantajları [25].	11
Çizelge 2.5: FeB ve Fe2B fazlarının karakteristik özellikleri [25].....	12
Çizelge 2.6: Borlama işleminde kullanılan bileşikler ve yöntemler [25].....	13
Çizelge 3.1: Gerçekleştirilen 3 farklı yüzey işlemi sonucunda elde edilen tabakaların özellikleri [26].....	18
Çizelge 3.2: Karbürleme ve borlama sonra elde edilen tabaka özellikleri [40]:	19
Çizelge 3.3: Borlama sonrası AISI 8620 çeliği üzerinde büyütülen borür tabakası özellikleri [41].....	19
Çizelge 4.1: AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi(%ağırlık).	23
Çizelge 4.2: Deneyler ve karakterizasyon sırasında kullanılan cihazların marka ve modelleri	24
Çizelge 4.3: 15 dk elektroliz ve 45 dk FH sürelerinde AISI 8620 çelik yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının SEM noktasal elementel analiz sonuçları.	43



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Yaygın Olarak Kullanılan Dişli Türleri [6].....	4
Şekil 2.2: Nissan Skyline aracına ait vites dişlisi sistemi [8]	6
Şekil 2.3: Pullanma ve çukurcuklaşmaya ait şematik gösterim [19].	9
Şekil 2.4: Bor kaynağının fiziksel yapısına göre borlama proseslerinin genel özellikleri [1].	14
Şekil 4.1: Deney düzeneğine ait görüntü.....	24
Şekil 4.2: Akım yoğunluğuna bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen tabakalarının genel görünümü. [950 °C, 15 dk , %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	26
Şekil 4.3: Farklı akım yoğunluklarında çelik malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film X-ışınları analizi. [950 °C, 15dk, %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	27
Şekil 4.4: Farklı akım yoğunluklarında borlanan numuların yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [950 °C, 15 dk, %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	28
Şekil 4.5: Farklı akım yoğunluklarında borlanan numuların kalınlık ölçümleri.[950 °C, 15 dk, %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	29
Şekil 4.6: Borlama süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri. [950 °C, 200 mA/cm ² , %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃].....	30
Şekil 4.7: Farklı sürelerde çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasına ait ince film XRD analizi [950 °C, 15 dk, %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	30
Şekil 4. 8: Farklı sürelerde borlanan çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [950 °C, 200 mA/cm ² , [%90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃].....	31
Şekil 4. 9: Farklı sürelerde borlanan çelik taban malzemelerin yüzeylerinde büyütülen borür tabakalarının kalınlıklarındaki değişim. [950 °C, 200 mA/cm ² , %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃].....	31
Şekil 4.10: Elektroliz sıcaklığına bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri. [15 dk, 200 mA/cm ² , %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	32
Şekil 4.11: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik malzemelerin ince film XRD analizleri. [200 mA/cm ² , 15 dk, %90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃].....	33
Şekil 4.12: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik malzemelerin yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [15 dk, 200 mA/cm ² ,%90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	33
Şekil 4.13: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik numuların yüzeylerinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [15 dk, 200 mA/cm ² , [%90 Na ₂ B ₄ O ₇ + %10 Na ₂ CO ₃]	34

- Şekil 4.14:** 15 dk elektroliz ve ilave FH işlem sürelerine bağlı olarak, çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri [%90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃, 950 °C, 200mA/cm²]..... 36
- Şekil 4.15:** Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film XRD analizleri [950 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃] 37
- Şekil 4.16:** FH süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]..... 38
- Şekil 4.17:** Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarının kesit alan mikro yapı incelemesi [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃] 39
- Şekil 4.18:** Farklı sürelerde KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell C yapışma testi sonrası indentasyon izleri, [950 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃] 40
- Şekil 4.19:** 15 dk elektroliz ve ilave FH işlem sürelerine bağlı olarak, çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri. [%90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃, 1000 °C, 200mA/cm²]..... 41
- Şekil 4.20:** Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film XRD analizleri [1000 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]..... 41
- Şekil 4.21:** Farklı FH sürelerinde AISI 8620 çeliği yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının kesit alan mikro yapı incelemesi [1000°C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]..... 42
- Şekil 4.22:** FH süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [1000 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃] 42
- Şekil 4.23:** 15 dk elektroliz ve 45 dk FH sürelerinde AISI 8620 çelik yüzeyinde büyütülen borür tabakasının SEM görüntüsü. 43
- Şekil 4.24:** 1000 °C’de 15 dk KRTD-Bor + 45 dk FH uygulanan çizgisel element analizi sonuçları [200 mA/cm²%90 Na₂B₄O₇ +%10 Na₂CO₃]..... 44
- Şekil 4.25:**Farklı KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasına ait kesit alan sertlik dağılımları [1000 °C, 200 mA/cm², [%90 Na₂B₄O₇ +%10 Na₂CO₃]. 45
- Şekil 4.26:** Farklı sürelerde KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell C yapışma testi sonrası indentasyon izleri [1000 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]..... 45
- Şekil 4.27:** Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma testi sonucu 2 ve 3 boyutlu profilleri. [75 rpm, 5 N, 60 dk] 47
- Şekil 4.28:** Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin sürtünme katsayısı değişimleri [75 rpm, 5 N, 60 dk] 48
- Şekil 4.29:** Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma izlerinin ayrıntılı SEM incelemesi [75 rpm, 5 N, 60 dk]..... 48
- Şekil 4.30:** Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma testi sonucu 2 ve 3 boyutlu profilleri [25 rpm, 50 N, 3 saat, 80 °C] 50

- Şekil 4.31:** Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin sürtünme katsayısı değişimleri [25 rpm, 50 N, 3 saat, 80 °C]..... 51
- Şekil 4.32:** Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma izlerinin ayrıntılı SEM incelemesi [75 rpm, 5 N, 60 dk]..... 51
- Şekil A.1:** Daimler Benz Rockwell C testi değerlendirmesi.....62





VİTES DİŞLİ ÇELİĞİNİN KRTD-BOR YÖNTEMİ İLE BORLANMASI

ÖZET

Dişliler güç aktarım ve iletim sistemlerinde makine elemanı olarak büyük bir yere sahiptir. Otomobillerde dişliler, sahip oldukları mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerden dolayı çeliklerden imal edilmektedir. Ancak aşınmanın büyük risk arz ettiği aktarım sistemlerinde dişlilerin yüzey dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Günümüzde orta-segment araçlarda vites dişlileri yaygın olarak AISI 8620 çeliğinden üretilmekte ve yüzey özellikleri karbürleme ile iyileştirilmektedir.

Metalik malzemelerin yüzeylerini geliştirmek için, yüzeye element difüzyonu ve/veya kaplamanın gerçekleştirildiği bir çok uygulama mevcuttur. Gelişen teknoloji ile birlikte borlama, özellikle çeliklerin yüzeyinde sert bir tabaka oluşturarak yüzey özelliklerini geliştirmek için uygulanmaktadır. Borlama ile birlikte malzemelerin yüzeyine bor elementinin difüze olması ile birlikte yüzeyde borca zengin aşınma ve korozyon dayanımı yüksek bir tabaka oluşturulmaktadır. Klasik yöntemle borlamada çelikler üzerinde genellikle FeB ve Fe₂B fazlarını içeren tabaka elde edilmektedir. Ancak bu iki fazın aralarında ki özellikle termal genleşme katsayısı ve sertlik değerlerinin farklı olması aşınma ve yüzey yorulmasına maruz kalan malzemelerin kullanıldığı uygulamalarda kullanımlarını mümkün kılmamaktadır. Klasik borlamanın AISI 8620 vites dişli çeliğine uygulandığı literatür çalışması olmasına rağmen bu nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Klasik borlama yöntemine alternatif olarak geliştirilmiş elektrokimyasal esaslı KRTD-Bor (Katodik Redüksiyon Termal Difüzyon Yöntemi ile Borlama) tekniği, çevresel, düşük maliyetli bir yöntem olup, demir ve demirdışı malzemeler yüzeyinde kısa sürelerde homojen ve oldukça kalın borür tabakası oluşumunu mümkün kılmaktadır.

Bu tez kapsamında, karbürleme ve klasik borlama yöntemlerine alternatif olarak, AISI 8620 vites dişli çeliği üzerinde KRTD-Bor yöntemi ile, endüstriyel olarak talep edilen tek fazlı hemiborür (Fe₂B) tabakası homojen bir şekilde büyütülmesi hedeflenmiştir.

Tez kapsamında KRTD-Bor yönteminin, AISI 8620 vites dişli çeliği malzemesine uygulanması esnasında, akım yoğunluğunun (50-400 mA/cm²), elektrolit sıcaklığının (950-1100 °C), borlama süresinin (15-120 dk), taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasının kimyasına, morfolojisine ve kalınlığına olan etkileri incelenmiştir. Daha sonra yüzeyde tek fazlı Fe₂B elde etmek amacı ile faz homojenleştirme işlemi uygulanmıştır. Deneyler, çevresel elektrolit bileşimi olan %90 Na₂B₄O₇+ %10 Na₂CO₃ kullanılarak, orta frekans indüksiyon fırınında, grafit potanın anot ve çelik malzemenin katot olarak polarize edildiği koşulda gerçekleştirilmiştir. Morfoloji analizleri ve kalınlık ölçümleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiş, büyütülen borür fazları ince film x-ışınları yöntemi (XRD) ile belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen akım yoğunluğu deneylerinde, 50 mA/cm²'nin çelik malzemeyi katodik olarak koruyamadığı belirlenmiş ve yüzeyde demir borür tabakasının yanında Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ tabakalarının oluştuğu tespit edilmiştir. 100 mA/cm² ve üstü akım

yoğunluklarında, çelik taban malzeme üzerinde Fe₂B ve FeB fazları büyütülmüş, artan akım yoğunluğu ile beraber her iki tabaka kalınlıklarının artmıştır.

Uygulanan tüm borlama sürelerinde çelik taban malzeme üzerinde çift fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakaları homojen olarak büyütülmüştür. 60 ve 120 dakikada gerçekleştirilen borlama deneylerinde borür tabakasının yanında yüzeyde elementel bor oluştuğu tespit edilmiştir. 15 dakika sonucunda taban malzeme üzerinde toplam borür tabakası kalınlığı ortalama 50 µm, FeB tabaka kalınlığı ise 30 µm ölçülmüşken, süre 120 dakikaya çıkarıldığında toplam borür tabakası kalınlığı 160 µm, FeB kalınlığı ise 115 µm'ye çıkmıştır.

Elektroliz sıcaklığının büyütülen borür tabakasına olan etkileri incelendiği deneyler serisinde, 950 °C'de 47 µm ölçülen toplam borür tabakası kalınlığı, 1100 °C'de 75 µm olarak ölçülerek artan sıcaklığın toplam borür tabakası kalınlığını arttırdığı belirlenmiştir. Ancak 1000 °C üzerine çıkıldığında, artan sıcaklığa bağlı olarak, çelik matrisin içerisindeki bor atomlarının difüzyon hızının 1000 °C'den sonra çelik malzeme yüzeyindeki redüksiyondan daha hızlı olduğu tespit edilmiş ve 1000 °C'nin üzerinde FeB tabakasının kalınlığının azaldığı belirlenmiştir.

AISI 8620 vites dişli çeliği üzerinde, tek fazlı homojen Fe₂B tabakası büyütme için, 950 °C'de 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dakika süre ile numune borlanmış, anot-katot polarizasyonu kesilerek, FeB fazının Fe₂B fazına dönüşmesi için faz homojenleştirme (FH) işlemi uygulanmıştır. Artan FH süresi ile birlikte FeB fazının kalınlığı azaldığı belirlenmiştir.

950 °C 15 dk borlama ve akabinde gerçekleştirilen 80 dk FH işlemi sonucu AISI 8620 çelik taban malzeme üzerinde ortalama 115 µm kalınlığında tek fazlı Fe₂B bileşiminde homojen borür tabakası büyütülmüştür. Rockwell-C adhezyon testi ile büyütülen borür tabakasının çelik malzeme mükemmel (HF1) kalitede yapıştığı tespit edilmiştir. Toplam 95 dk süren KRTD-Bor prosesinin, süresini kısaltmak amacı ile elektroliz sıcaklığı artırılmıştır. 1000 °C'de gerçekleştirilen KRTD-Bor deneylerinde, 15 dk borlama süresine ilave 45 dk FH sonucunda, AISI 8620 vites dişli çeliği üzerine HF1 en iyi kalite yapışma özelliği gösteren ortalama 100 µm kalınlığında tek fazlı Fe₂B borür tabakası homojen olarak büyütülmüştür. Büyütülen borür tabakası çelik taban malzemenin sertliğini (≈300 HV) 5 kat artırmış, ortalama 1600 HV sertliğinde borür tabakası elde edilmiştir.

Elde edilen sert borür tabakasının aşınma özelliklerinin incelenmesi amacı ile kuru ve yağlı ortamda aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Her iki koşulda borür tabakasının çelik malzemenin aşınma özelliğini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, KRTD-Bor yöntemi ile toplam 1 saat proses süresinde AISI 8620 vites dişli çeliği malzemesinin yüzeyinde tek fazlı Fe₂B borür tabakası büyütülmüş ve çelik malzemenin sertliği yaklaşık olarak 5 kat artırılması ile birlikte borür tabakasının çeliğin aşınma direncinin artmasında pozitif bir etki yaratığı belirlenmiştir.

BORIDING OF TRANSMISSION GEAR STEEL VIA CRTD-BOR

SUMMARY

Gears are used as a machine tool in power transmission and transferring systems. In automobiles, gears are made of steels due to their mechanical properties (i.e., their relative high strength and toughness values). However, in transmission systems where wear is the major risk, it is desired that the gears' tooth have extreme surface properties. In today's middle-class vehicles, the transmission gears are widely produced from AISI 8620 steel and their surface properties are improved via carburizing.

There are many applications in which diffusion based surface modifications and / or coatings are performed to improve the surfaces of metallic materials. Along with the developing technologies, boriding is applied to steels in order to improve surface properties by forming hard layers on the surface of steels. In boriding process, boron is diffused to the surface of the materials and a layer with high wear and corrosion resistance is grown on the surface. In the case of boriding via the conventional pack/paste methods, the boride layers containing FeB and Fe₂B phases are generally obtained on the applied steels. However, the difference between these two phases, especially the thermal expansion coefficient and hardness values, make it impossible to use in the applications where materials exposed to wear and surface fatigue. Despite the fact that there are researches in the literature conducted by conventional boriding techniques for the boriding of AISI 8620 transmission gear steel, boriding is not used in industrial applications due to the reasons of two phase boride layer formation.

Electrochemical based CRTD-Bor (Cathodic Reduction Thermal Diffusion Boriding) technique, developed as an alternative to conventional boriding methods is an environmentally and low cost method. Plus these, this new boriding method makes it possible to form a homogeneous and very thick boride layer on the surface of iron and nonferrous materials in a short time.

In this thesis, it is aimed to grow the industrially demanded single-phase hemiboride (Fe₂B) layer on AISI 8620 transmission gear steel via the CRTD-Bor method in order to present an alternative surface modification way to carburizing and conventional boriding methods. With the scope of the thesis, the effects of current density (50-400mA / cm²), the electrolysis temperature (950-1100°C), and duration (15-120min) on the grown boride layers' chemistry, morphology and thickness were investigated.

Moreover, the phase homogenization procedures were applied to obtain a single phase Fe₂B. Experiments were carried out in a medium frequency induction furnace using the environmentally friendly electrolyte composition 90% Na₂B₄O₇ + 10% Na₂CO₃, where the graphite crucible polarized as an anode and the steel substrate polarized as cathode. The morphology analyzes and thickness measurements were performed with an optical microscope and scanning electron microscope (SEM), and the boride layer phases grown on the surface were determined by the thin film x-ray method (XRD). In the current density experiments, it was determined that 50 mA / cm² could not provide enough cathodic protection where it was found that Fe₂O₃ and Fe₃O₄ phases were formed along with iron borides on the surface. At current densities of 100mA / cm² and above, both Fe₂B and FeB phases were grown on the substrate and the thickness of both layers were increased with increasing applied current densities.

During all the boriding periods, the double phase (FeB + Fe₂B) iron boride layers were uniformly grown on the steel substrate. In the boriding experiments carried out at 60 and 120 minutes, elemental boron was found on the surface beside the grown iron boride layers. After 15 minutes of CRTD-Bor, the thicknesses of total boride layer and FeB layers were measured as 50 μm and 30 μm, respectively. When the time was increased to 120 minutes, the thickness of total boride layer and the FeB layers extended to 160 μm and 115 μm respectively.

In experiments where the effects of electrolysis temperature on the grown boride layers were examined, it was determined that the thickness of TBT was increased from 47 μm grown at 950 °C to 75 μm formed at 1100 °C. However, when the electrolysis temperature exceeds to 1000 °C, it is observed that the diffusion rate of boron atoms in the steel matrix became faster than the reduction of them, hence consequently the thickness values of FeB layers were decreased beyond 1000 °C.

In order to grow a single-phase homogenous Fe₂B layer on AISI 8620 transmission gear steel, phase homogenization (PH) process was adapted to CRTD-Bor treatment. The steel samples were borided at 950 °C with the current density of 200 mA / cm² for 15 minutes and then anode-cathode polarization was cut off to initiate the PH stage where the top FeB phase convert into Fe₂B layer. It was determined that the thickness of FeB phase decreased with increasing PH durations. A homogeneously 115 μm thick, single Fe₂B phase boride layer was grown on the AISI 8620 steel substrate at 950 °C with applying 15 min of CRTD-Bor and additional 80 min of PH treatment. The Rockwell-C adhesion test revealed that the grown boride layer adhered to the steel substrate with the perfect (HF1) quality. In addition to the optimized condition, the electrolysis temperature was increased in order to reduce total CRTD-Bor process time which was 95 minute at 950 °C. Accordingly, CRTD-Bor experiments was planned to conduct at 1000 °C. Consequently, Single-phase Fe₂B boride layer was homogeneously grown after 15 min of CRTD-Bor and additional 45 minutes of PH, with the average thickness of 100 μm which exhibits the best adhesion quality (HF1) on the AISI 8620 transmission gear steel matrix. The grown boride layer on the steel substrate increased the hardness of the steel base material (300 HV) by 5 times, and the boride layer with the average hardness of 1600 HV was obtained. In order to examine the wear properties of the obtained hard boride layers, the pin on disk wear tests were conducted both in dry and oily medium. Consequently, it was determined that CRTD-Bor boriding improve the wear properties of the steel material.

As a result of these investigation, homogenously thick, single-phase Fe_2B boride layer was grown on the surface of AISI 8620 gear steel after 1 hour of CRTD-Bor treatment and it was found that the boride layer has a considerable contribution on the wear resistance of the steel.





1. GİRİŞ

Dişli sistemleri, insanlık tarafından milat öncesi tarihlerden beri güç aktarım ve iletim sistemlerinde makine elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Aşınmanın büyük risk arz ettiği aktarım sistemlerinde dişlilerin yüzey dayanımının yüksek olması istenmektedir.

Otomotiv sektöründe dişli sistemleri motorda üretilen enerjinin tekerlere ulaştırılarak aracın hareket etmesindeki kilit elemanlardır. Kullanım sırasında aşınma ve yüzey yorulmasına maruz kalan, yüzeylerinde hasar oluşumu başlayan dişli sistemleri harcanan birim yakıt başına sağlanan enerji miktarını azaltacak ve ilerleyen hasarlarda aracı kullanılamaz hale getirecektir. Dolayısıyla aracın servis ömrü kısalmaktadır. Bu nedenle dişlilerin yüzeylerinin, ısıl işlemler veya yüzey işlemleri ile iyileştirilmesi gerekmektedir.

Günümüzde mevcut endüstriyel uygulamalarda karbürleme işlemi kullanılarak dişlilerin yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Borlama prosesi 100 yıldan fazla bir süredir çeliklere uygulanmaktadır. Borlama ile birlikte malzemenin yüzey sertliği, dayanımı ve aşınma direnci artırılarak malzemenin yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Borlama ile çelikler üzerine karbürlemeye oranla daha sert ve kalın bir tabaka oluşturulmasına karşın, klasik yöntemlerde çelik yüzeyinde çift fazlı FeB ve Fe₂B oluşmaktadır. Bu iki tabakanın sertlikleri ve termal genleşme katsayısı farkından dolayı özellikle yüzey yorulmasına ve aşınmaya maruz kalan uygulamalarda kullanılması verimli değildir.

Bu tez kapsamında, geleneksel kutu ve pasta borlama yöntemlerine kıyasla çevresel, hiç bir zararlı atığı ve gaz emisyonu olmayan, çok hızlı borür tabakası büyütme sağlayan yerli borlama yöntemi olan KRTD-Bor [1] yöntemi kullanılarak vites dişli çeliği yüzeyinde endüstriyel olarak talep edilen kompozisyonda (homojen Fe₂B) borür tabakası büyütülmesi hedeflenmiştir.



2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Otomobillerde Kullanılan Dişliler

Dişliler, bir eksen etrafında dönen dişleri olan çarklardır. Tek başlarına kullanılamazlar, hareketin sağlanması ve aktarılması için en az iki tane dişli gerekmektedir. Milattan önce 300'lü yıllardan itibaren dişlilerin kullanıldığı bilinmektedir [2]. Mühendislik uygulamalarında sıkça karşılaştığımız dişliler temel olarak hareketin aktarılmasının yanı sıra gücün avantajlı kullanılmasını sağlayarak hareketin verimini artırmakta ve kullanım amaçlarına göre hareketi ve gücü artırıp azaltabilmekte ve hareketin yönünü değiştirebilmektedirler. Günümüzde oyuncak, beyaz eşya, ofis gereçleri, otomotiv, denizcilik ve uzay sektörü gibi birçok alanda makine elemanı olarak kullanılmaktadırlar [3].

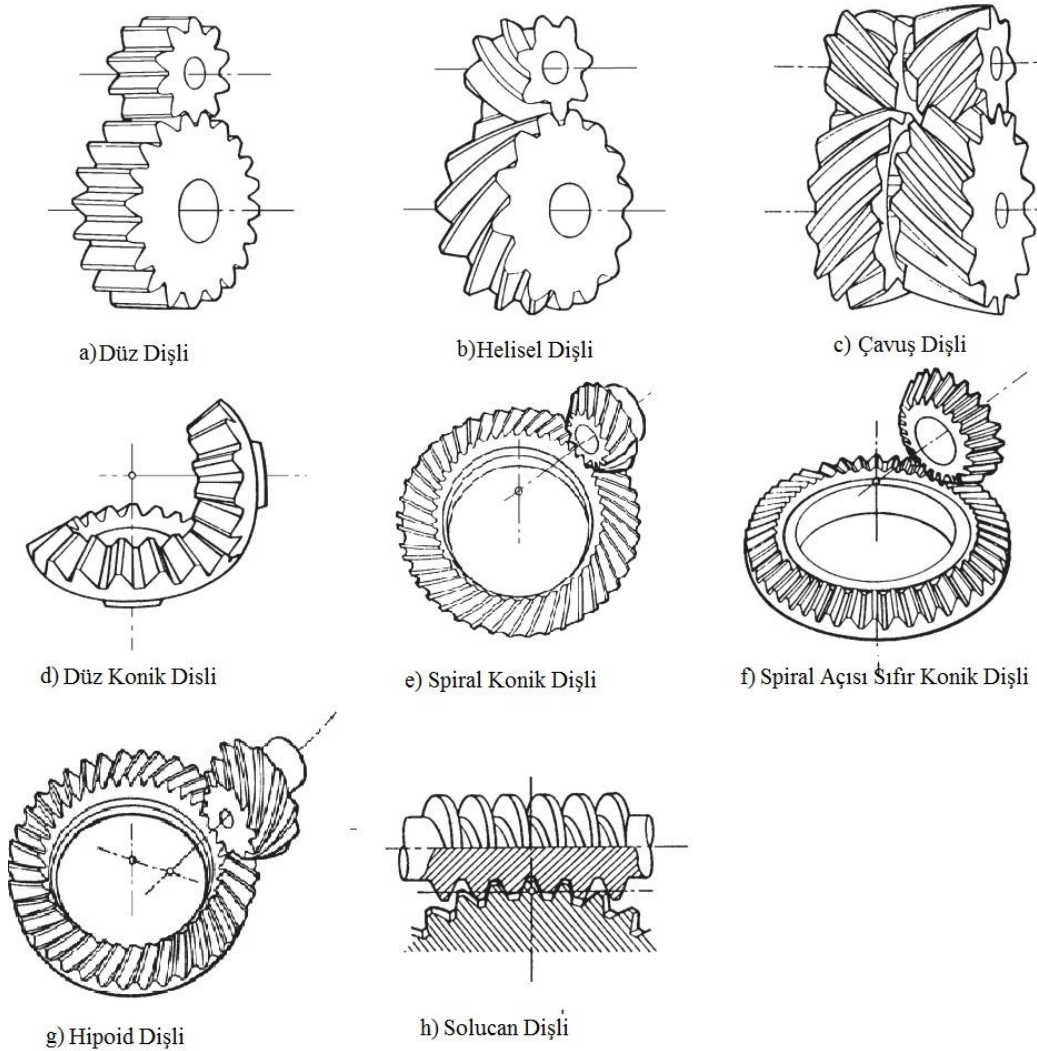
Dişliler için sessizlik, yük, geometri ve eksen konumuna göre birden fazla sınıflandırma yapmak mümkündür. Eksenlerinin konumlarına göre dişlilerin sınıflandırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir [4]. Gelişen mühendislik ve teknoloji ile beraber ihtiyaca yönelik farklı geometrilerde üretilmekte olup, kullanılmaya devam edilmektedirler. Yaygın olarak kullanılan dişliler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Yaygın olarak kullanılan dişlilerin eksenlerine göre sınıflandırılması [4].

Paralel Olan Dişliler	Kesişen Dişliler	Paralel Olmayan ve Kesişmeyen Dişliler
Düz Dişliler	Düz Konik Dişliler	Hipoid Dişliler
Helis Dişliler	Spiral Konik Dişliler	Solucan Dişliler
Çavuş Dişliler	Spiral Açısı Sıfır Konik Dişliler	-

Motorlu tüm taşıtlarda gücün iletiminde ve dağılımında dişliler rol almaktadır. Bazı taşıtlarda kullanılan çelik dişli sınıfları ve türleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Otomobillerde dişliler, vites kutusunda, diferansiyelde ve motorda bulunur.

Motorda bulunan volan dişlisi, marşa basıldığında marş motorunun hareketinin motora iletilmesi sağlar, aynı zamanda motor ile vites kutusu arasında temas halindedir. Motordan gelen gücü istenilen devir ve torka bölünmesi ise vites kutusu tarafından gerçekleştirilir. Manuel vites kutusunda düz dişliler ve helisel dişliler bulunurken, otomatik vites kutularında düz ve helisel dişlilerde dahil olduğu “planet” adı verilen dişli sistemi bulunmaktadır. Diferansiyel de ise hipoid dişliler bulunmaktadır. Diferansiyelin görevi tekerlerin birbirinden bağımsız hareketine olanak vermek ve gereken durumlarda tekerleklerin farklı hızlarda dönmesini sağlamaktır. Örneğin viraj dönülürken dışta kalan tekerleğin içteki tekerleğe göre daha hızlı dönmesi gerekmektedir [5]



Şekil 2.1: Yaygın Olarak Kullanılan Dişli Türleri [6].

Çizelge 2.2: Taşıtlarda kullanılan dişli türleri ve AISI çelik standartları [4].

Uygulama	Dişli Türü	AISI Çelik Standardı
<i>Diferansiyel</i>		
Otomobil	Hipoid, Düz/Spiral Konik	4118, 4140, 4027, 4028, 4620, 8620, 8622, 8626
Kamyon	Hipoid, Düz/Spiral Konik	4817, 4820, 8625, 8822
<i>Volant</i>		
Otomobil	Düz	1045,1050
<i>Şanzıman</i>		
Otomobil	Helisel, Düz	4027, 4028, 4118, 8620
Kamyon	Helisel, Düz	4027, 4028, 4620, 4817, 5120, 8620, 8622, 9310
Deniz Taşıtı	Helisel, Düz, Helisel/Spiral Konik	8620, 8622
Arazi Aracı	Helisel, Düz, Düz/Spiral Konik	1118, 5130, 5140, 5150, 8620, 8822, 9310
Traktör	Çavuş, Düz	4118, 4140, 8822

2.1.1 Vites Dişlileri

Şanzıman, motor devri ile tekerlek hızı oranını ayarlayan bir dişli sistemidir. Şanzımandaki dişliler sayesinde motor devri tekerlek hızına göre ayarlanmaktadır. Manuel şanzımanlarda kullanıcı tarafından, otomatik şanzımanlarda ise elektronik sistem tarafından, vites değiştirilmektedir. Araç kalkış yapacağı zaman ya da yokuş çıkarken güç, küçük çaplı dişliden büyük çaplı dişliye aktarılarak tork artırılır, hızlanma durumunda ise büyük dişliden küçük dişliye geçilerek motorun devri düşürülmekte, tork azaltılarak hız artırılmaktadır [5]. Vites sayısına ve şanzımanın manuel ya da otomatik olmasına göre vites kutusu içinde bulunan dişli sayısının miktarı değişmektedir. İleri yönde hareket için helisel dişliler kullanılırken geri viteste düz dişliler kullanılmaktadır [7]. Şekil 2.2’de 6 ileri vitesi olan Nissan Skyline GT-R aracına ait şanzıman gösterilmektedir [8]. Düz dişliler paralel bir şaft arasında ya da bir şaft ile kremayer dişlisi arasında ki hareketi iletmek için kullanılırlar. Silindirik biçimindedirler, dişleri düz ve dönme eksenine paralel olup üretilmesi en ucuz ve kolay olan dişli türleridir [4,9].



Şekil 2.2: Nissan Skyline aracına ait vites dişlisi sistemi [8].

Yüksek hız uygulamalarında sesli çalıştıklarından dolayı tercih edilmezler [4,9]. Otomobil vites kutularında geri vites dişlilerinde genellikle düz dişliler kullanılmaktadır [7].

Helisel dişlilerde ise düz dişlilerden farklı olarak, dişler, çarkın ekseni ile belirli bir helis açısı oluştururlar. Bu açıdan dolayı iki veya daha fazla diş sürekli temas halinde bulunur ve dişlerin toplam temas alanı artar. Artan temas alanı ile birlikte birim alana etkiyen yük azalacağından, helisel dişliler, aynı boyuta sahip düz dişlilere kıyasla daha çok yük taşırlar. Helis açısının getirdiği bir diğer avantaj ise, helisel dişlilerin düz dişlilere göre daha sessiz çalışmalarıdır. Artan helis açısı ile beraber dişlilerin çıkardığı ses azalır, uygulamalarda 45° 'ye kadar helis açısına sahip dişliler kullanılmaktadır. Ancak helis açısının getirdiği dezavantajlar da mevcuttur. Temas alanının artması ile birlikte sürtünme artmakta, dişlinin verimi azalmaktadır aynı zamanda helis açısından kaynaklanan aksenal yük, açı doğrultusunda dişliye baskı yapmaktadır bu da helisel dişli uygulamalarında aksenal bir taşıyıcı yatak kullanımını zorunlu kılmaktadır [9,10].

2.1.1.1 Vites dişlilerinde meydana gelen hasarlar

Otomobil şanzımanında dişliler, bir kuvvet altında dönerek, yüksek hızlarda çalışmaktadırlar ve birbirlerine temas halindedirler. Birden fazla etkenin olduğu bu çalışma koşullarında, bir süre sonra dişlilerde hasarlar meydana gelebilmektedir [11]. Dişlilerde meydana gelen hasarların yağa bağlı olan ve yağdan bağımsız hasarlar olarak 2 ana gruba ayrıldığı tablo Çizelge 2.3'de verilmiştir [4].

Çizelge 2.3: Dişlilerde meydana gelen temel hasarlar [4].

Yağa Bağlı Hasarlar	Yağdan Bağımsız Hasarlar
Yüzey Yorulması	Aşırı Yük
Aşınma	Eğme Yorulması

Amerika Dişli Üreticileri Birliği (AGMA) standardında dişli hasarları 7 başlıkta incelenmiştir [12] Bunlar;

- Aşınma
- Yüzey Yorulması
- Eğme Yorulması
- Scuffing
- Çatlama
- Plastik Deformasyon
- Kırılma

Ancak AGMA standartında çatlama başlığı altında, dişli imalatı sırasında meydana gelen çatlama incelenmiş olup, bu hasarların oluşmasında dişli kullanımı sırasında oluşan yüzey olaylarının etkisi yoktur. Bu nedenle tez kapsamında incelenmemiştir.

Aşınma

Aşınma bir yüzey hasarı olup, yüzey ile temas eden malzeme arasındaki hareketten ötürü yüzeyden parçanın kopup ayrılması ya da malzeme kaybı olmadan yüzeyden kopan parçanın yüzeyin başka bir bölümüne kaynaşarak yüzeyin bozulmasıdır. Aşınma özellikle dişliler gibi karşıt yüzeylerin dönme ve/veya kayma hareketi gerçekleştirdiği durumlarda yaygındır [13]. Dişlilerde aşınma, çalışma sıcaklığı, dişlilere etkileyen yük miktarı ve dişlilerin dönme hızına bağlı olmakla birlikte, en çok yağa ve yağın viskozitesine bağlıdır. Vites dişlilerinde meydana gelen hasarlar abrasif ve adheziv olmak üzere 2 ana gruba ayrılmaktadır [4,14].

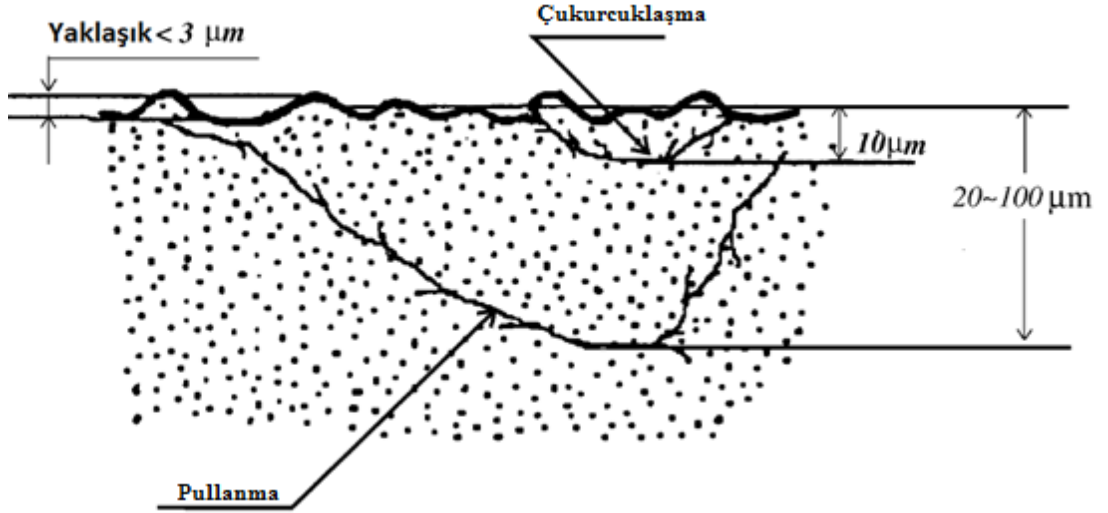
Abrasif aşınma, iki dişli yüzey arasında, yağın içinde kirlilik oluşturan sert ve sivri parçacıkların, dönme kuvveti ile yüzeylere temas ederek yüzeyleri aşındırmasıdır. Yağın kirliliği dişlilerin çalışması sonucu yüzeylerden kopan parçalardan, şanzıman dişlisi montajı sırasında yüzeyde kalan toz vb. kirlilerden ve şanzıman iç basıncını ayarlayan hava filtresinden içeriye giren partiküller gibi dış etmenlerden de kaynaklanabilir. Abrasif aşınmayı önlemek için, aracın ilk 50 saat kullanımından sonra ve periyodik olarak yağ değiştirilmeli, ince filtreler kullanılmalıdır. Bunun yanında

spektroskopik analiz gibi yöntemlerle de yağın kirlilik durum ve viskozitesi düzenli olarak takip edilerek yağın değiştirilip aşınmanın önüne geçilmesi mümkündür [4,12]. Bir biri üzerinde kayan yüzeylerde özellikle ilk kullanımdan dolayı yüzeydeki bölgesel olarak yüzey pürüzlülüğünden dolayı, temas alanı küçülebilir. Bu nedenle etkiyen kuvvet artar. Artan kuvvet ile beraber malzeme plastik deformasyona uğrar ve ısı açığa çıkarır ve mikro kaynak bölgeleri oluşur. Mikro kaynaklar nedeniyle bir yüzeyde ki malzeme diğer yüzeye kaynaklanır. Adheziv aşınma, yüzeyde mikro kaynak bölgelerinin oluşması sonucu meydana gelir ve çalışma sırasında meydana gelen mikro kaynaklar kırılarak yüzeyi aşındırmayı sürdürür [4,15]. İlerlemediği durumlarda, adheziv aşınma yüzey pürüzlülüğünü azalttığından dolayı faydalıdır. Bu yüzden adheziv aşınmayı önlemek için, ilk kullanımda hafif yük altında çalıştırılmalıdırlar ve üretim aşamasının sonunda yüzey mümkün olduğunca pürüzsüz olmalıdır. Yağın temiz olmasına ve viskozitesine dikkat edilmelidir. Eksik yağlanma ve kirlilikler adheziv aşınma oluşumunu tetiklemektedir [12].

Adheziv aşınmanın şiddetli olduğu durumlar “scuffing” olarak adlandırılmaktadır. Yağ miktarının azaldığı ya da yağın viskozitesinin düştüğü durumlarda, iki yüzeyin bir birine direkt temas etmesi sonucu bölgesel kaynaklanma veya yırtılma meydana gelir. Dişlilerin ilk kullanılmaya başlandığı durumlarda sıkça görülür. Yüzey pürüzlülüğünden ve yetersiz yağlanmadan kaynaklanır ve yüksek sıcaklık “scuffing” oluşumunu tetikler. Dişlinin “scuffing” aşınmasına dirençli hale getirilmesi ise minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimumu yüzey sertliği ile sağlanır [12,16].

Yüzey Yorulması

Yüzey yorulması, dönme ve kayma hareketi yapan dişlilerin yüksek çevrimleri sonucu yüzeyin maruz kaldığı tekrarlı gerilmeden dolayı, yüzeyin çatlayarak deformasyona uğramasıdır [4,17]. Yüzeydeki pürüzlülük ve düzensizlik, çatlakların başlamasını tetiklediği için, dişli yüzeyinin mümkün olduğunca pürüzsüz olması gerekmektedir. Ancak yüzey kalitesi tek başına yeterli değildir. Yağ, karşıt yüzeylerin direkt temasını engellediğinden ötürü, yağın miktarına ve viskozitesine dikkat edilmesi gerekmektedir [18]. Yüzey yorulmaları genel olarak makro pitting (pullanma) ve mikro pitting (çukurcuklaşma) olarak ikiye ayrılmaktadır. Pullanma ve çukurcuklaşmaya ait şematik gösterim Şekil 2.3’de verilmiştir [19]. Pullanma yüzey yorulmasına bağlı olarak, yüzey veya yüzey-altı kaynaklı çatlak oluşumu sonucunda, oluşan çatlakların yüzeye paralel ilerleyerek kopmasının ardından yüzeyde hasar meydana gelmesi durumudur.



Şekil 2.3: Pullanma ve çukurcuklaşmaya ait şematik gösterim [19].

Düşük yüklerde çalışma durumunda dahi uzun kullanım süreleri sonucunda pullanma oluşumu mümkündür [12]

Çukurcuklaşma oluşumu, pullanmaya, benzemekle birlikte, küçük ve derin olmayan deformasyonları ifade eder. Bazı durumlarda ilerleyip pullanmaya dönüştüğü örnekleri görülsede, çukurcuklaşmanın genellikle dişlilere zararı yoktur ve dişlilerin çalışmaya devam etmesi ile birlikte çukurcuklaşma oluşumlarının yok olması mümkündür [12,19].

Eğme yorulması

Henüz hasarsız bir dişlide, dişlere etkileyen kuvvet malzemenin çekme dayanımının altındadır. Ancak dişli yüzeyindeki herhangi bir noktadaki kusurlardan kaynaklı durumlarda bölgesel olarak etkileyen kuvvetlerden dolayı çekme dayanımı aşılar bunun sonucunda plastik deformasyon meydana gelir ve çatlak oluşumu başlar. Tekrarlı olarak etkileyen kuvvetten ötürü tane sınırları boyunca çatlak ilerler ve nihai olarak kırılma gerçekleşir [12,20].

Kırılma

Çatlaklar ilerleyip malzemenin kırılmasına yol açacağı gibi, aşırı yüklenme, ani darbe veya montaj sırasında yanlış hizalamadan dolayı bölgesel olarak düzensiz yüklenme olacağından ötürü dişlilerde kırılma meydana gelebilir. Önlenmesin de en önemli etken kullanılan dişli malzemesinin tokluğudur [12].

2.1.1.2 Vites Dişlilerine Uygulanan Yüzey İşlemleri

Günümüzde alt-orta segment araçlarda vites dişlisi olarak düşük alaşımlı çelik kullanılmaktadır. Literatür verilerinden [4] ve Güven Dişli gibi yerli üretici firmalardan edinilen bilgiye göre yaygın olarak AISI 8620 çeliğinin kullanıldığı belirlenmiştir.

Dişlilerin uzun ömürlü olması için, temel olarak, eğilmelere karşı dişli malzemesinin tok, dişli yüzeyinin aşınmaya dirençli olması için sert ve yüzey yorulmasının en az olması için yüzeyde kalıntı gerilmesine sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler dişli malzemesine yüzey işlemleri uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Yüzey işlemleri, taban malzemenin tokluğu etkilenmeden, malzemenin yüzeyinde sert bir tabaka oluşturmasını sağladığı için, doğrudan sertleştirme yöntemlerine göre avantajlıdır [21].

Uygulanabilecek yüzey işlemleri, malzemenin karakteristiğine göre, istenilen yüzey özelliklerine göre ve maliyete göre değişiklik göstermektedir. Mevcut uygulamalarda AISI 8620 dişli çeliğine karbürleme uygulanmaktadır [22].

Karbürleme işlemi maksimum %0,30 karbon içeren, düşük alaşımlı çeliklerin, yeteri kadar karbon içeren ortamda yüzeye karbon difüze ettirilmesine dayanan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzeye karbon difüzyonu ile birlikte malzeme ile yüzey arasında bir karbon gradyenti oluşturulmaktadır. Bu sayede malzemenin iç kısımları yumuşak ve tok kalırken, yüzeyde sert bir tabaka oluşturulur. Karbonun difüzyon derinliği, kullanılan karbon kaynağına, süreye ve karbürleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir [22,23]

4 çeşit karbürleme yöntemi vardır bunlar, kutu karbürleme, gaz karbürleme, sıvı karbürleme ve vakum karbürlemedir. Sürekli üretime uygun ve karbür kalınlığı kontrolüne açık olması sebebiyle yaygın olarak gaz karbürleme işlemi uygulanmaktadır. En iyi yüzey özellikleri vakum karbürlemede alınmakla birlikte, proses maliyetinin yüksektir [4,22].

2.2 Metallerin Borlanması

İlk olarak 1895 yılında Moissan tarafından çeliklerin borlanabileceğinin önerilmesiyle başlayan borlama prosesi metallerin yüzeylerini sertleştirmede kullanılan ve bor atomunun metalik malzemeye difüzyonu sonucu yüzeyde tek fazlı Me_2B veya çift fazlı

intermetalik Me_2B+MeB yapısının oluşumuna dayanan bir yüzey işlemidir. Borlama, temizlenmiş malzemenin, bor ihtiva eden çeşitli ortamlarda (katı, sıvı, gaz), 700 ile 1000 °C sıcaklıkları arasında, 1 – 10 saat arasında değişen sürelerde uygulanabilmektedir [24,25].

Borlama ile yüzeyde oluşturulan tabakalar, uygulandığı malzemenin, sertlik, korozyon direnci, oksidasyon ve aşınma dayanımı değerlerini arttırıp, sürtünme katsayısını düşürerek malzemenin yüzey özelliklerinin geliştirmesini sağlamaktadır, bu özellikleri artırmasının yanı sıra borlama prosesinin dezavantaj yarattığı durumlar mevcut olup Çizelge 2.4’de özetlenmiştir. Altın, bizmut, kadmiyum, bakır, kurşun, antimon, tellür ve çinko dışında ki tüm metallerde borür oluşturulmasının dışında, borlamanın sermet ve seramik malzemelere de uygulandığı çalışmalar mevcuttur [1,24,25].

Çizelge 2.4: Borlamanın avantajları ve dezavantajları [25].

AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Artan sıcaklıkla beraber borür tabakası sertliğini muhafaza ederek kararlılığının sürdürür.	Hassas bir yöntem olup, çok işçilik gerektirmesinden dolayı borlama diğer termokimyasal yüzey işlemlerine göre yüksek maliyete sahiptir.
Oldukça geniş aralıktaki çelik türleri borlanabilmektedir.	
Borlama sonucu, demir esaslı malzemelerin oksitleyici olmayan seyreltik asitlerde ve alkali ortamlarda korozyon dayanımı artmaktadır.	Taban malzemenin kompozisyonuna bağlı olarak borlamadan sonra tabaka kalınlığının 5 – 25 % oranında hacimsel artış meydana gelmektedir.
Borür yapısı orta seviyede ki oksidasyona 850 °C’ye kadar dirençlidir ve sıvı metallere karşı da dayanımları mevcuttur.	Geleneksel yollarla işlenen yüzeylerde, kaplama tabakalarında çatlak ve kırılmalar meydana gelebilmektedir.
Borlama işlemi, uygulandığı malzemenin sürtünme katsayısını azaltarak, yağlayıcıya olan gereksinimi azaltmaktadır.	Eğer takım çeliklerine, borlandıktan sonra, sertleştirme ve temperleşme uygulanacaksa, borür tabakasının özelliklerinin korunması amacıyla bu işlemlerin inert atmosfer veya vakum altında gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
Borlanmış parçaların, oksitleyici ve korozif ortamlarda, yorulma ömürleri ve servis süreleri yüksektir.	

2.2.1 Çelik üzerinde büyütülen FeB ve Fe_2B tabakalarının karakteristiği

Çeliklerin borlanması, çelik yüzeyinde genellikle FeB ve Fe_2B fazlarından meydana gelen, çift katmanlı borür tabakası oluşmaktadır. Çizelge 2.5’de FeB ve Fe_2B fazlarının karakteristik özellikleri verilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda tek fazlı Fe_2B oluşumu tercih edilir. Birinci nedeni, FeB tabakasının Fe_2B tabakasından sert ve kırılğan olmasıdır. Ayrıca bu iki fazın arasında, borlamanın ardından gerçekleştirilen soğutma

sırasında, termal genleşme katsayıları da birbirilerinden farklı olması nedeniyle, FeB tabakasında çekme ve Fe₂B tabakasında basma gerilimi meydana gelmekte ve FeB – Fe₂B ara yüzeyinde mikro ve makro çatlaklara sebep olmaktadır[1,25]. Bu çatlakların oluşması özellikle dişli çarklar gibi, yüzey teması ve çevrim sayısı yüksek olan, uygulamalarda istenmeyen durumdur [26,27].

Çizelge 2.5: FeB ve Fe₂B fazlarının karakteristik özellikleri [25].

Özellik	FeB	Fe ₂ B
Kristal Yapı	Ortorombik	Hacim Merkezli Tetragonal
Elastik Modülü [GPa]	590	285 – 295
Elastik Deformasyon [%]	3,24	3,93
Mikro sertlik [GPa]	19-21	18-20
Bor İçeriği [% Ağ.]	16,23	8,83
Yoğunluk [g/cm ³]	6,75	7,43
Termal Genleşme Katsayısı [ppm/°C]	23 (200-600 °C)	7,65 (200 – 600 °C) 4,25 (100 – 800 °C)
Ergime Sıcaklığı [°C]	1540 - 1657	1389-1410

2.3 Borlama Yöntemleri

Termokimyasal olarak gerçekleştirilen borlama; endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen yöntemlerdir. Termokimyasal borlamada; katı, sıvı ve gaz bor bileşikleri bor kaynağı olarak kullanılmakla birlikte bu yöntemlerde kullanılan bileşikler ve yöntemler Çizelge 2.6’ da verilmiştir. Yeni teknolojik ilerlemelerle birlikte termokimyasal borlama yöntemleri dışında; plazma borlama ve akışkan yatakta gibi yeni tekniklerde geliştirilmiştir. Diğer taraftan termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme , kimyasal buhar biriktirme, plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleri de borlama uygulamalarında kullanılmaktadır. Borlama prosesi genel olarak bor kaynağının fiziksel yapısına göre sınıflandırılmaktadır. kullanılan borür yapısına göre sınıflandırılmış borlama yöntemlerinin başlıca özellikleri de Şekil 2.7’de verilmiştir [1,24,25,28,29].

Kutu borlama, borlama prosesinde kullanılacak düzeneğin basit bir işçilikle yapılabilmesi ve işlemin kolayca gerçekleştirilebilmesi, güvenlik açısından yüksek risk oluşturmaması, borlama süresince toz karışım bileşiminin değişiminin çok

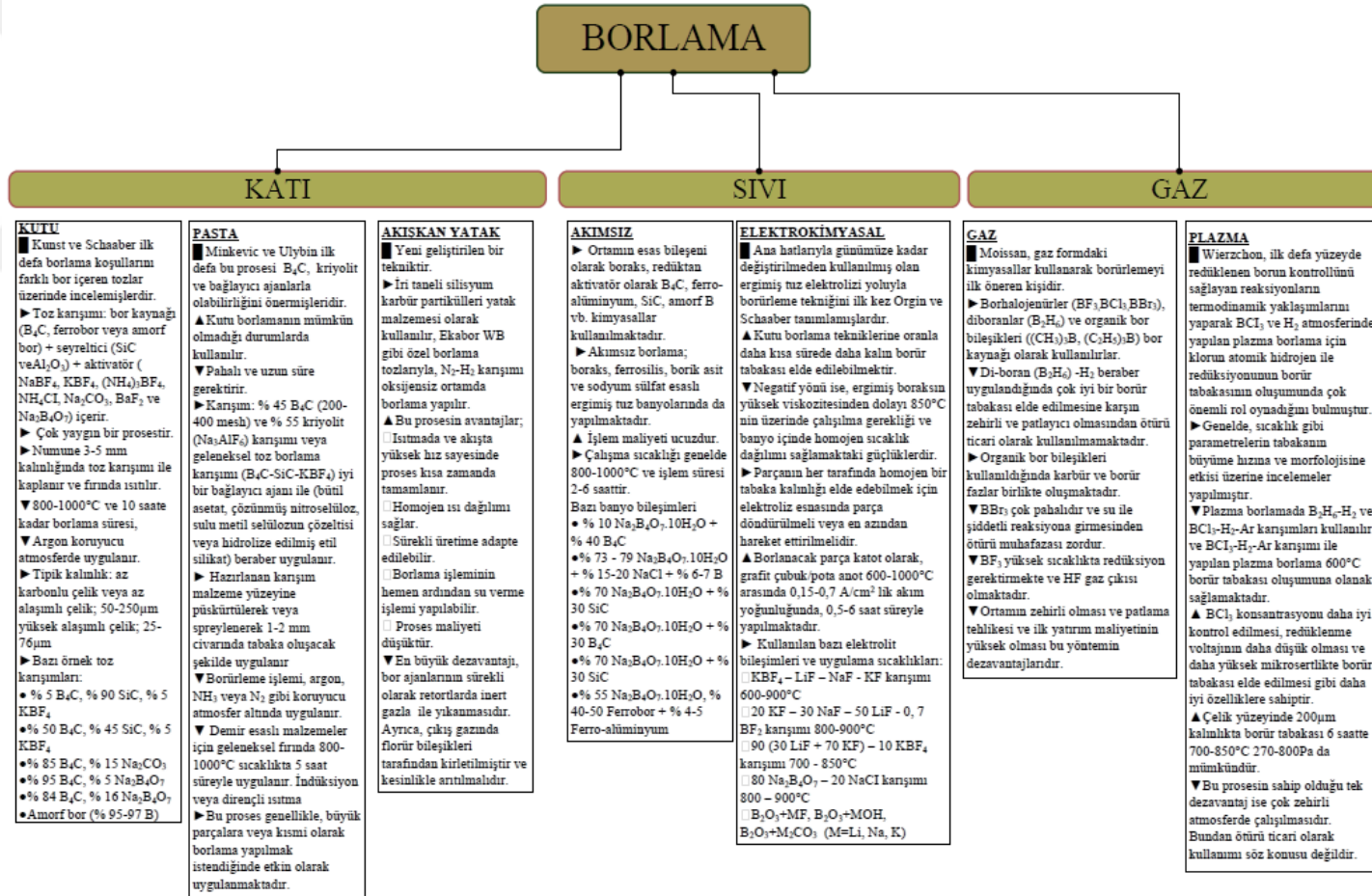
az olması ve bu yöntemde fazla donanım ihtiyacı duyulmaması nedeniyle düşük maliyetli olup yaygın olarak kullanılan bir metottur. Borlama işlem süresi 6 - 10 saat arasında değişmesine karşın; tüm proses süreci genel olarak numunelerin yerleştirilmesi ve kutu borlama tozları ile kaplanması (kutulama), ısıtma ve temizleme adımlarından oluşur ve ortama 40 saattir [1,24,25,29].

Çizelge 2.6: Borlama işleminde kullanılan bileşikler ve yöntemler [25].

Bor Kaynağının Fiziksel Hali	Bileşim	Yöntem	
GAZ	BF ₄ , BCl ₃ , BBr ₃ saf veya +H ₂	Uygulama sıcaklığında gaz formundaki borür kimyasal indüktif veya boru fırın kullanılarak ısıtılmış malzeme	
	B ₂ H ₆ + H ₂		
SIVI	(CH ₃) ₃ B/ (C ₂ H ₅) ₃ B	Ergimiş tuz elektrolizi (parça katot olarak kullanılırken, anot olarak grafit veya platin kullanılır.)	
	Na ₂ B ₄ O ₇ (+NaCl/+B ₂ O ₃)		
	HBO ₂ + NaF		
	Florürlü elektrolit içinde bor veya katı bor bileşiği		
	B ₄ C (+NaCl/+BaCl ₂ /+NaBF ₄)		Kapanacak malzeme ergimiş haldeki banyoya daldırılır.
	Na ₂ B ₄ O ₇ + B ₄ C		
Sulu Na ₂ B ₄ O ₇ çözeltisi	Sulu çözeltide indüktif ısıtma		
KATI	B ₄ C + Na ₂ AlF ₆ + Etilsilikat	Fırında ısıtma ve toz veya pasta ile kaplama	
	Ferrobör + Na ₂ AlF ₆ + Cam suyu		
	Amorf Bor (+ Aktivatör)		
	Ferrobör (+Aktivatör)		
B ₄ C (+Aktivatör)			

2.3.1 Katodik Redüksiyon Termal Difüzyon ile Borlama (KRTD-Bor)

Bu yeni, yerli borlama yöntemi, çevreye duyarlı (herhangi katı/sıvı atık oluşumu ve zehirli/zararlı gaz emisyonu olmadan) alternatif borlama yöntemi olarak geliştirilmiş olup, hızlı borür tabakası büyütme olanak sağlayan, elektrokimyasal esaslı borlama yöntemidir.



Şekil 2.4: Bor kaynağının fiziksel yapısına göre borlama proseslerinin genel özellikleri [1].

Elektroliz sırasında katotta meydana gelen reaksiyonların mekanizmaları tam olarak kanıtlanamamakla birlikte, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ esaslı elektrolitte gerçekleşen reaksiyonlar dizisinde bor atomunun katot üzerinde oluşumu aşağıda belirtilen olası reaksiyon serileri doğrultusunda açıklanmaktadır. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ esaslı elektrolit, sisteme uygulanan akım yoğunluğu ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak, termal disosiyasyona uğrar (2.1). Ayrışma sonucu oluşan $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4$ elektrolitik olarak iyonlarına ayrışır (2.2). Daha sonra anotta $\text{B}_2\text{O}_4^{2-}$ oksitlenirken katotta ise Na^{++} iyonları redüklenir (2.3). Bu redüklenme sonucu katotta sodyum birikmesi beklenirken, sodyum, kendisinden daha soy bir element olan boru sementasyon ile redükleyerek katot yüzeyinde elementel bor oluşturur (2.4-2.5). Sürekli gerçekleşen bu tepkimeler sonucunda biriken bor, yüksek sıcaklığın etkisi ile katot matrisi içerisinde ilerler [1,30-32].



KRTD-Bor yöntemi ile borlama çalışmalarında G.Kartal ve çalışma grubu, 50 – 700 mA/cm^2 arasında değişen akım yoğunluklarında, (850 – 1000 °C) sıcaklıklarında 5 – 120 dk arasında ki sürelerde sabit elektrolit bileşiminde ergimiş tuz elektrolizi ile borlama deneylerini gerçekleştirmiş ve bu parametrelerin büyütülen borür tabakasının sertliğine, kalınlığına morfolojisi üzerine etkilerini araştırmış ve oluşturulan borür tabakalarının büyümesi kinetik olarak incelemiştir. Çalışmalarında, çelik malzeme üzerinde ergimiş tuz elektrolizinin ardından oluşan $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ çift fazlı borür tabakasında ki FeB fazından, faz homojenleştirme işlemi olarak tanımladıkları yöntem ile termodinamik olarak gerçekleşmesi mümkün olmayan denklem 2.7’de verilen reaksiyonu gerçekleştirmeye yönelik tek fazlı yapının elde edilmesini sağlamak amacı ile deneyler yapmıştır [1,28,33-36].



AISI 1018 çelik taban malzeme üzerinde tek fazlı Fe_2B borür tabakasını büyütme için yaptıkları deneylerde, öncelikle elektrokimyasal borlama (EB) işlemi, 15 dk süresince 200 mA/m^2 akım yoğunluğunda ve 950 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve denklem 2.1 de belirtilen reaksiyonun gerçekleşmesi için farklı faz homojenleştirme (FH) süreleri

taranmıştır (15 -45 dk). Gerçekleştirilen deneyler sonucunda AISI 1018 çelik taban malzeme üzerinde 15 dk EB borlama + ilave 45 dk FH sonucunda ortalama 70 µm kalınlığında tek fazlı Fe₂B borür tabakası büyütülmüştür. Tüm bu çalışmalar sonucunda ekip tarafından, çevresel bir elektrolit kullanılarak KRTD-Bor yöntemi ile çeliklerin geleneksel yöntemlerin dışında, borür tabakasının çelik üzerinde daha hızlı büyütülmesi sağlanmış ve endüstriyel olarak talep edilen kalınlıkta ve tek fazlı Fe₂B kompozisyonunda büyütülmesine imkân sağlayacak alternatif borlama yöntemi geliştirilmiştir [1,30,36,37].



3. KONU HAKKINDA DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Güneş ve arkadaşları [38] borlanmış DIN 20MoCr4 (AISI 8620) çeliğinin aşınma davranışlarını inceledikleri çalışmada bor kaynağı olarak Ekabor-II tozu kullanmış 4 saat boyunca 900 °C’de borlama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Borlama sonucunda FeB + Fe₂B çift fazına sahip ortalama 62,84 µm kalınlığında borür tabakası elde etmişlerdir. Elde ettikleri borür tabakasının sertliği 1848 HV ile 1475 HV arasında değişmektedir. Borlanmış numunelerin aşınma davranışlarını incelemek için 10 N yük altında 0.2m/sn hızında 500m kayma mesafesinde kuru ortamda aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir ve aşındırıcı olarak 8 mm yarıçaplı WC-Co topları kullanmışlardır. Aşınma testi sonucunda borlanmamış numunenin borlanmamış numuneden 5 kat daha fazla aşındığını tespit etmişlerdir.

Gunes, Ulker, Taktak [39] AISI 8620,52100 ve 440C çeliğini plazma pasta borlama yöntemiyle borladıkları çalışmada bor kaynağı olarak %100 boraks kullanmışlardır ve çelikleri 700 ve 800 °C’de 3-5 saat süre ile borlamışlardır. Borlama sonucu AISI 8620 çeliğinde 700 °C’de 3sa ve 5sa sonunda sırasıyla 27 µm ve 30 µm borür tabakası 800 °C’de ise 3 ve 5 saat sonunda sırasıyla 36 ve 44 µm borür tabakası büyütülmüştür ve büyütülen tüm borür tabakalarının çift fazlı FeB+Fe₂B fazlarından oluştuğunu belirtmişlerdir. 700° C’de 3saat borlama sonucunda maksimum sertliğin 1730 HV ve 5saat sonunda ise 1824 HV olduğunu tespit etmişlerdir. Artan proses sıcaklığıyla birlikte daha sert olan FeB tabakasının oluşumu nedeni ile tabaka sertliğinin arttığını belirtmişlerdir.

Düzcükoğlu ve arkadaşları [26] AISI 8620 çeliğinden imal edilmiş dişlilerde, borlama, karbürleme ve borkarbürlemenin oyuklaşmaya ve aşınmaya etkisini incelemişlerdir. Borlama işlemi %70 boraks ve %30 SiC karşımı içeren banyo içerisinde 930 °C’de 2,5 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Borkarbürleme işlemi 5 adımda gerçekleştirilmiştir;

- 1- 930 °C’de %1 karbon ihtiva eden atmosferde karbürleme
- 2- 820 °C’de %0.65 karbon ihtiva eden fırında 20 dk bekleme + yağda su verme
- 3- %60 NaCl- %40 NaCO₃ tuz banyosunda 1 saat süre ile dekarbürizasyon + yağda su verme

- 4- % 70 boraks – 30 SiC banyoda 3 saat süre ile 950 °C’de borlama.
- 5- %60 NaCl- %40 NaCO₃ tuz banyosunda 850 °C’de bekletme + yağda su verme

Karbürleme işlemi, propan atmosferinde %1 karbon içeren ortamda 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen 3 farklı yüzey işlemi ile elde edilen kalınlık ve sertlik sonuçları çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Gerçekleştirilen 3 farklı yüzey işlemi sonucunda elde edilen tabakaların özellikleri [26].

Yüzey Modifikasyon Metodu	Borür Tabakası Kalınlığı (μm)	Difüzyon Bölgesi Kalınlığı(μm)	Tabaka Sertliği (HV0.1)	Difüzyon Bölgesi Sertliği (HV0,1)	Göbek Sertliği (HV0.1)
Borlama	50-60	150-160	1678-1690	390-410	380-385
Karbürleme	—	50-60	780-810	590-550	390-410
Bor-karbürleme	90-120	70-80	1515-1578	520-535	385-395

Aşınma testleri 130,7 ve 180,4 Nm tork altında 750 dev/dak hızında “Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau” FZG dişli test düzeneğinde yağ kullanarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonuçlarına göre, en yüksek sertliğe sahip numunenin borlanmış dişli olduğu tespit edilmesine rağmen bor-karbürlenmiş numunenin aşınma direnci borlanmış ve karbürlenmiş numuneye göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Deneylede gerçekleştirilen borlama sonucu FeB ve Fe₂B çift fazlı borür tabakası oluştuğu ve bu fazların termal genleşme katsayılarının farklı olması ve FeB fazının daha kırılğan bir yapı oluşturması neden ile iki faz arasından çatlakların meydana geldiği ve oluşan çatlakların yük altında çukurcuklaşmaya yol açtığı ifade edilmiştir. Ancak bor karbürleme ile, sert borür tabakası ve göbek arasında daha yumuşak bir sertlik gradyanı (520-535 HV) elde edilmiştir. Bu yumuşak geçiş bölgesinin, çukurlaşma direnci üzerinde yararlı bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir [26].

Çalık ve arkadaşları [40] borlanmış ve karbürlenmiş AISI 8620 çeliğinin aşınma davranışını ve sertliğini inceledikleri çalışmada öncelikle çeliklerin yüzey gerilimlerini gidermek için 627 °C’de 10 saat süre ile tavlamaşlardır. Borlama işlemi için bor kaynağı olarak Ekabor-II tozu kullanmış olup, ile 4 saat süre ile 937 °C’de kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Karbürleme işlemi grafit ortamında 4 saat süre ile 937 °C’de gerçekleştirmişlerdir. Borlama ve karbürleme işlemi sonucu elde edilen tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Yapılan XRD analizine göre, borür tabakası Fe₂B ve SiC fazı ihtiva ettiği tespit edilmiş olup, SiC

patternlerinin numune hazırlama sırasında kullanılan SiC zımparalardan geldiği düşünülmektedir. Elde edilen karbür tabakasında yüzeyden taban malzemenin içine doğru azalan bir karbon konsantrasyonuna sahip olduğu analizler sonucu ölçülmüş ve SiC₃ fazı nadiren görülmüştür.

Çizelge 3.2 Karbürleme ve borlama sonra elde edilen tabaka özellikleri [40].

Yüzey Difüzyon Metodu	Büyütülen Tabaka Kalınlıkları (μm)	Geçiş bölgesi Kalınlığı (μm)	Yüzey Sertliği (HV0.1)	Difüzyon Bölgesi Sertliği (HV0.1)	Göbek Sertliği (HV0.1)
Karbürleme	5-6	55-65	870-885	540-580	370-405
Borlama	55-65	155-165	1578-1610	380-410	370-395

Her iki yöntemle yüzey işlemine tabi tutulan çeliklerde, difüzyon tabakası dışında taban malzemenin, içerdikleri Fe₂B, α -SiC ve Fe₃C fazlardan kaynaklı, daha sert bir geçiş tabakası meydana geldiği tespit edilmiştir. Geçiş bölgesinin varlığı yüzeydeki sert tabakadan taban malzemeye doğru geçişte sertliğin kademeli olarak azalmasına olanak verdiği ifade edilmiştir. Aşınma testleri 90 N yük altında 2-4-6-8-16 saat süre ile yapılmıştır. Artan süre ile birlikte aşınma miktarının arttığı tespit edilmiş olup, karbürleme işlemine tabi tutulan AISI 8620 çeliği işlem görmemiş çelikten daha az, borlanmış çelikten daha çok aşınmıştır. Aşınma deneyi sonucunda, aşınma davranışı ile sertlik arasında lineer bir orantı olduğu ve karbürlemenin AISI 8620 çeliğinin aşınma direncini artırmada borlama kadar efektif bir yüzey işlemi olmadığı, bunun nedeninin de borür tabakasının karbür tabakasından daha sert ve kalın olması olarak açıklanmıştır.[40]

Erkan Yılmaz [41] yaptığı çalışmada AISI 8620'den imal edilmiş dişliyi kutu borlama yöntemi ile, bor kaynağı olarak %90 Ekabor-2 + %10 SiC tozu kullanarak, 5 saat süre ile 900 °C'de borlamıştır. Borlama sonucunda çift fazlı FeB + Fe₂B tabakasından oluşan ortalama 75 μm kalınlığında bir borür yapısı elde etmiştir. Çizelge 3.3'de borlama sonucu elde edilen ortalama kalınlık ve sertlik değerleri verilmiştir. Borür tabakasının ince olmasının nedeni çelik içerisinde bulunan Mo, Si ve Cr'un borür tabaka kalınlığının azaltması olarak ifade etmiştir.

Çizelge 3.3: Borlama sonrası AISI 8620 çeliği üzerinde büyütülen borür tabakası özellikleri [41].

Numune	Tabaka Kalınlığı (μm)	Geçiş bölgesi Sertliği (HV0.1)	Yüzey Sertliği (HV0.1)	Göbek Sertliği (HV0.1)
AISI 8620	75	450	1450	370-405

Gerçek çalışma ortamına uygun aşınma test düzeneği geliştirerek, dişlilerin karşılıklı çalışması suretiyle 62 saat süre ile aşınma testi gerçekleştirmiştir. Aşınma testi

sonucunda ağırlık kaybı baz alınarak borlanmamış dişlinin borlanmış dişliye göre 25 kat daha fazla aşındığını tespit etmiştir. Oluşturulan borür tabakasının korozyon direncine olan etkisini incelemek için, %10 H₂SO₄ çözeltisinde 2 saat süre ile oda sıcaklığında, 60 °C'de ve 80 °C'de deneyler gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen korozyon deneyi sonucu, ağırlık kaybı kıyaslanarak borlanmamış dişlinin borlanmış dişliye göre 95 kat aşındığını ifade etmiştir [41].

Uluköy ve [27] arkadaşları yaptığı çalışmada AISI 8620 çeliğinden imal edilmiş dişlileri karbürleme, dekarbürleme ve borlama işlemlerine tabi tutarak ısıl işlemlerin çeliğin mikroyapısına ve sertliğine olan etkilerini incelemişlerdir. En yüksek sertlik değerine borodekarbürizasyon işleminde ulaşmışlardır. Bu işlemi gerçekleştirmek için öncelikle 2 saat süre ile karbürleme işlemine tabi tutmuşlar ardından karbülenmiş numunelere dekarbürizasyon işlemi uygulamışlardır. Daha sonra, numuneleri 950 °C'de 3 saat süre ile boraks ve SiC karışımı içeren tuz banyosunda borlamışlardır. Borlamanın ardından yağ verme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Numuneleri %60 NaCl + %40 NaCO₃ karışımı içeren tuz banyosunda 30 dakika süre ile 850 °C temperlemişlerdir. Bu işlemler sonucu yüzeyde tek fazlı Fe₂B fazına sahip ortalama 70 µm kalınlığına sahip borür tabakası büyümüşlerdir. Elde edilen tabakanın sertliğini 2290 HV_(0,025) olarak ölçmüşlerdir.

Güneş [42], çalışmasında plazma pasta yöntemiyle borlanmış AISI 8620 çeliğinin aşınma davranışını incelemiştir. AISI 8620 taban malzemesine farklı oranlarda boraks, SiC ve B₄C toz karışımı kullanarak borlamıştır. Borlama işlemini 5 saat süre ile 973-1023-1073 K'de gerçekleştirmiştir. Oluşturulan borür tabakaları FeB+ Fe₂B fazı içermektedir. En kalın borür tabakasına (53 µm) 100% boraks kullanarak 1073 K 5 saat süre ile borladığı deneyde ulaşmış iken en sert borür tabakasına (1924 HV) %30 boraks + %70 B₄C kullandığı deneyde 1073 K'de 5 saatin sonunda ulaşmıştır. Bor kaynağı olarak kullanılan pasta karışımlarının oranının oluşturulan borür tabakasına etkisinin olmadığını, elde edilen sertliklerin birbirlerine yakın olduğunu proses sıcaklığının sertliğe olan etkisinin daha fazla olduğunu ifade etmiştir. Artan sıcaklıkla beraber büyütülen borür tabakasındaki FeB miktarının Fe₂B'ye göre daha fazla arttığı bu doğrultuda yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin arttığını aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün de arttığını belirtmiştir. Borlanmış numunelerin aşınma davranışlarını incelemek için 10 N yük altında 0.2m/sn hızında 500m kayma mesafesinde kuru ortamda aşınma testlerini gerçekleştirmiş ve aşındırıcı olarak 8 mm yarıçaplı WC-Co

pinleri kullanmıştır. En çok aşınan numune işlem görmemiş AISI 8620 çeliği iken en az aşınan numune en yüksek sertliğe sahip olan numunedir.

Soydan Y, ve arkadaşları [43] gerçekleştirdiği çalışmada kutu borlama yöntemi ile borlanmış AISI 1050, 4140 ve 8620 çeliklerinin aşınma davranışını incelemiştir. Borlam işlemi Ekabor-1 tozu ile 950 °C'de 2 ve 8 saat süre ile gerçekleştirmiştir. Borür tabakalarının ortalama kalınlığı 2 saat sonunda 100 µm 8 saat sonunda ise 200 µm olarak ölçmüştür. Aşınma testini pin-on-disk cihazında gerçekleştirmiş pin olarak deneyde kullanılan çelik alaşımlarını kullanmış disk olarak AISI 1020 çeliğini seçmiştir. Aşınma testlerini 2 m/sn kayma hızında 30 N yük altında gerçekleştirmiştir. Aşınma testleri sonucunda borlanmış numunelerin normalize edilmiş numunelere göre aşınma direncinin çok daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Borlanmış AISI 8620 çeliğinin sertliğinin diğerlerinden daha yüksek olmasına rağmen, AISI 1050, 4140 ve 8620 çeliklerinin aşınma oranlarında çok bir farklılık olmadığını ve aynı şekilde normalize edilmiş AISI 8620 ve AISI 4140 çeliklerinin sertliğinin aynı olmasına rağmen (220 HV) AISI 8620 çeliğinin AISI 4140 çeliğinden daha fazla aşındığını belirtmişlerdir. Bu sonuçlar doğrultusunda sertlik ve adhesiv aşınma oranları arasında direkt bir ilişki olmadığını ifade etmiştir.

Tabur ve arkadaşları [44] yaptıkları çalışmada kutu borlama yöntemi ile AISI 8620 çeliğini, 850-900-950 °C sıcaklıklarda, 2-4-6 saat süre ile Ekabor-2 toz karışımı kullanarak borlamışlardır. Büyütülen borür tabakaları FeB + Fe₂B fazlarından oluşmaktadır. Büyütülen borür tabakaları kalınlıkları ve sertlikleri, 950 °C'de 2 saat için 110 µm-1710 HVN_(0,01) 6 saat için 250 µm-1850 HVN_(0,01), 850 °C'de 2 saat için 150 µm-1650 HVN_(0,01) 6 saat için 80 µm-1750 HVN_(0,01) olarak ölçülmüştür. Aşınma testleri pin-on-disk cihazında 10-20-30 N yük altında, 0.2 m/s hızında gerçekleşmiş olup aşındırıcı olarak Al₂O₃ kullanılmıştır. En fazla aşınan numune 950 °C - 2 saat koşullarında borlanan numune iken en az aşınmayı 850 °C - 6 saat koşullarında borlanan numune göstermiştir. Daha az sıcaklıkta ve daha uzun sürede borlanan numunenin daha yüksek aşınma direnci göstermesinin nedenini, artan borlama sıcaklığı ile birlikte FeB tabakası kalınlığının arttığı, bu durumda aşınma oranını arttırdığı olarak ifade etmişlerdir. Bu nedenle borlamanın düşük sıcaklıkta ve uzun sürelerde yapılmasının daha avantajlı olacağını belirtmişlerdir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar için, kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de verilmiş olan AISI 8620 dişli çeliği KRTD-Bor işlemi için taban malzeme olarak seçilmiştir. Bu çelik malzeme yüzeyinde endüstriyel olarak talep edilen tek fazlı hemiboride (Fe_2B) kompozisyonunda, homojen olarak borür tabakası büyütme için KRTD-Bor prosesinin parametreleri optimize edilmiştir. Bu kapsamda, uygulanan akım yoğunluğunun, elektroliz ve faz homojenleştirme sürelerinin ve elektroliz sıcaklığının büyütülen borür tabakasının bileşimine, kalınlığına, sertliğine ve taban malzemeye olan yapışma özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.1: AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi(%ağırlık).

AISI Standardı	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
8620	0,18-0,23	0,20-0,35	0,7-0,9	0,40-0,60	0,15-0,25	0,40-0,70

Deneylerde kullanılan 25 mm çapında 4 mm kalınlığında ki çelik numuneler, borlama öncesi yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi amacı ile 800 numaralı zımparaya kadar zımparalanmış, ardından aseton içerisinde konularak oda sıcaklığında 15 dakika süre ile ultrasonik olarak numunelerin yüzeyleri temizlenmiştir.

KRTD-Bor deneyleri orta frekanslı bir fırın içerisinde yerleştirilmiş ve anot olarak polarize edilmiş grafit pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler ve karakterizasyon sırasında kullanılan cihazlar Çizelge 4.2’de, KRTD-Bor deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin resmi Şekil 4.1’de verilmiştir. Borlanması istenen çelik malzemeler katot olarak polarize edilmiştir. Elektrolit kompozisyonu olarak daha önce yapılan çalışmalarda belirlenen [1] optimum bileşim (%90 $Na_2B_4O_7$ ve %10 Na_2CO_3) kullanılmıştır. Elektroliz sıcaklık değişimi, sürekli olarak pota içerisinde yerleştirilen N-tipi termokupllar ile takip edilmiştir. Deneyler sırasında, sadece incelenecek parametre değiştirilmiş olup, diğer parametreler deney düzeneğine göre optimize edilmiş değerlerde sabit tutulmuştur. Deney sonunda, akım kesilerek katot parça sistemden uzaklaştırılmış ve 15 dakika süre ile havada soğutulmaya

bırakılmıştır. Daha sonra yüzeyde katılaştıran elektrolit kalıntılarını temizlemek amacıyla 100 °C suda 30 dakika süre ile yıkanarak temizlenmiştir.



Şekil 4.1: Deney düzeneğine ait görüntü.

Çizelge 4.2: Deneysel ve karakterizasyon sırasında kullanılan cihazların marka ve modelleri.

Cihaz	Marka Model
Orta Frekans İndüksiyon Fırını	Opdel ve Nersetech
Doğru Akım Kaynağı	Instek
Kesme Diski	Struers 20s25
Bakalite Alma Cihazı	Metamount-2
Parlatma Cihazı	Presi Mecopol P230
Optik Mikroskop	Leica
XRD	Philips PW-3710
Taramalı Elektron Mikroskopu	Jeol-JSM5410, Jeol-JSM7000
Mikro Sertlik Cihazı	Wilson Tukin 1102
Rockwell C yapışma testi	Zwick/Roel
Aşınma Cihazı	CSM Tribometer
Optik Profilometre	WYKO-NT110

Daha sonra metalografik numune hazırlamak için kesme diskisi ile borlanan katot parçası kesilmiş ve karakterizasyon çalışmaları için bakalite alınmıştır. 80 numaralı

zımparadan başlanarak 2500 numaralı zımparaya kadar zımparalanmış ve 1 μ 'luk elmas çözültisi ile parlatılmıştır.

Metalografik olarak karakterizasyona hazırlanan parçalarda;

- Numunelerin kesitleri optik mikroskop ile görüntülenmiş kalınlık ölçümleri ve morfolojik incelemeler gerçekleştirilmiştir.
- Büyütülen borür tabakasındaki elementlerin dağılımını incelemek için taramalı elektron mikroskobunda incelenmiş ve elementel EDS analizi yapılmıştır.
- Borür tabakasının faz analizi ince film X-ışınları yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Giriş açısı 2θ olarak seçilmiş ve taramalar $10^\circ - 90^\circ$ arasında yapılmıştır. Analiz sonucu ışınların şiddeti en yüksek değere göre normalize edilerek değerlendirilmiştir.
- Oluşan borür tabakasının kesit alan sertlik dağılımı Vickers mikro sertlik test cihazında 50 gf uygulanarak gerçekleştirilmiştir.
- Borür tabakasına yapışma testi VDI 3198 standardına göre 150 kgf uygulanarak standardına göre Daimler-Benz Rockwell C testi ile gerçekleştirilmiş ve oluşan indentasyon izleri optik mikroskopta incelenerek borür tabakasının yapışma özelliği incelenmiştir.

Oluşturulan borür tabakalarının aşınma özelliklerinin incelenmesi için, kuru ve yağlı ortamlarda pin-on-disk aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan pinler 10 mm yarıçap olacak şekilde kavslendirilmiştir, ve tez kapsamında kullanılan çelikler için idealize edilen parametrelerde borlanmıştır. Borlanmış ve borlanmamış diskler deney öncesinde ayna parlaklığında parlatılmış ve alkol ile temizlenmiştir.

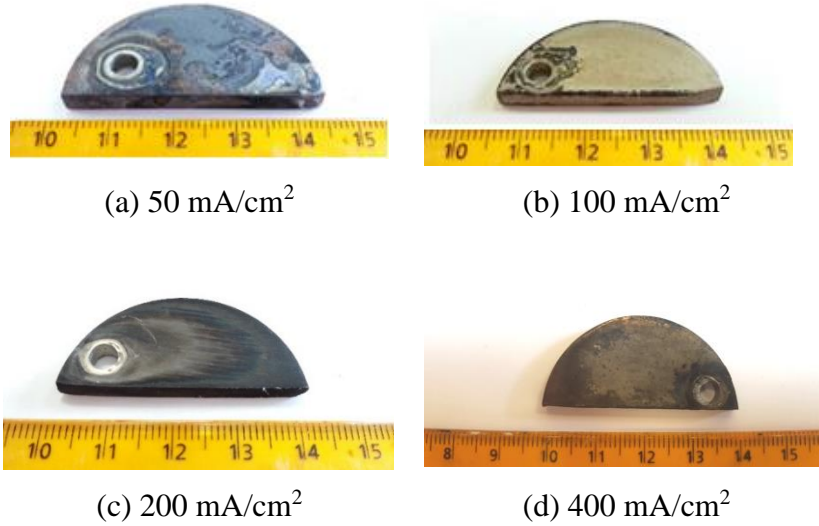
Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri, 5N yük uygulanarak, 75 rpm hızında 1 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Yağlı aşınma testleri ticari olarak satılan şanzıman yağı kullanılarak 80°C 'de 50 N yük altında 25 rpm hızında 3 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerden sonra pin ve diskler alkol ile temizlenmiş, aşınan yüzeylerin iki ve üç boyutlu profilleri profilemetre cihazı ile ölçülmüştür. İlave olarak deneylerde zaman bağlı sürtünme katsayısı ölçülerek grafikleri çizilmiştir. Aşınma karakteristiğinin belirlenmesi için ise aşınan yüzeyler taramalı elektron

mikroskobunda incelenmiştir. Sonuçlar, borlanmış ve borlanmamış numuneler için karşılaştırılmıştır.

4.1 KRTD-Bor Yöntemi ile Vites Dişlilerinin Borlanması ve Karakterizasyonu

4.1.1 Akım Yoğunluğunun Etkisi

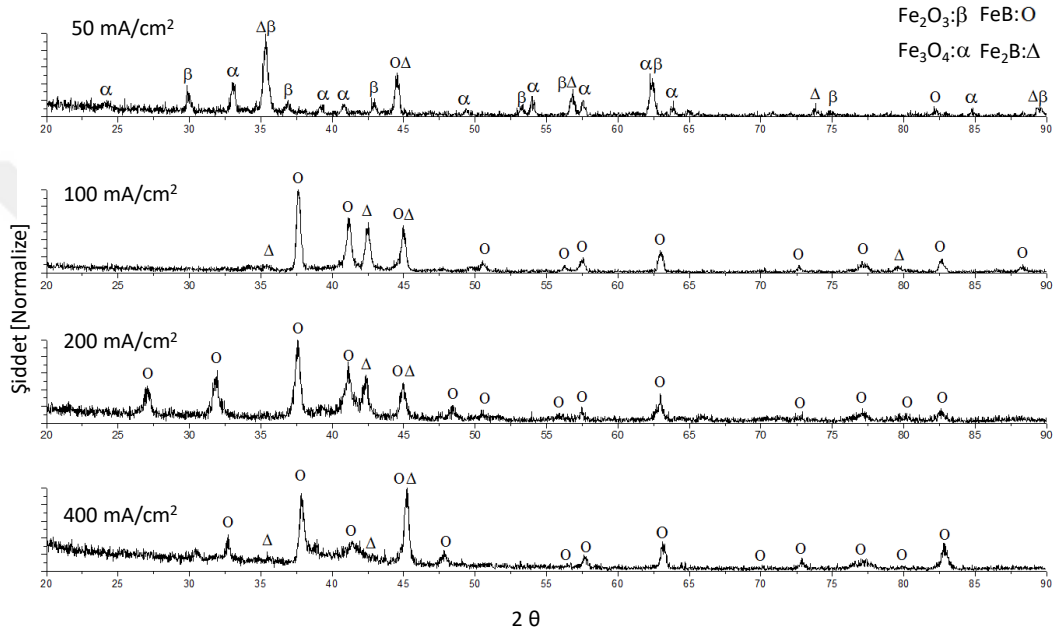
Borlama prosesi difüzyon kontrollü olduğu için, birim zamanda elektrolit/matris sınırında redüklenen bor miktarının, borür tabakasının kalınlığını, morfolojisini, sertliğini değiştirmesi beklenmektedir [34] Akım yoğunluğuna bağlı olarak oluşturulan demir borür tabaka kalınlıkları ve faz bileşimlerini incelemek amacı ile literatür çalışmalarından hareketle [1] 950 °C sıcaklıkta ve 15 dk borlama süresi sabit tutularak, 50, 100 ve 200 mA/cm² ve 400 mA/cm² akım yoğunluklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen elektroliz işlemi sonunda oluşturulan demir borür tabakalarının yüzey görünümü değişimi Şekil 4.2’ de verilmiştir. Tabakaların genel görünümüne bakıldığında 50 mA/cm² akım yoğunluğunda borlanan numunenin (Şekil-4.2-a) yüzeyinde oksit tabakalarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.2: Akım yoğunluğuna bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen tabakalarının genel görünümü. [950 °C, 15 dk , %90 Na₂B₄O₇ + % 10 Na₂CO₃]

Deneyler sonucunda akım yoğunluğuna bağlı olarak çelik yüzeyinde oluşturulan borür tabakasına ait ince film X-ışınları faz analizi Şekil 4.3’de verilmiştir. Faz analizleri sonuçları incelendiğinde, 50 mA/cm² akım yoğunluğunda demir hemiborür (Fe₂B) tabakasının yanında demir oksit fazlarının da oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar

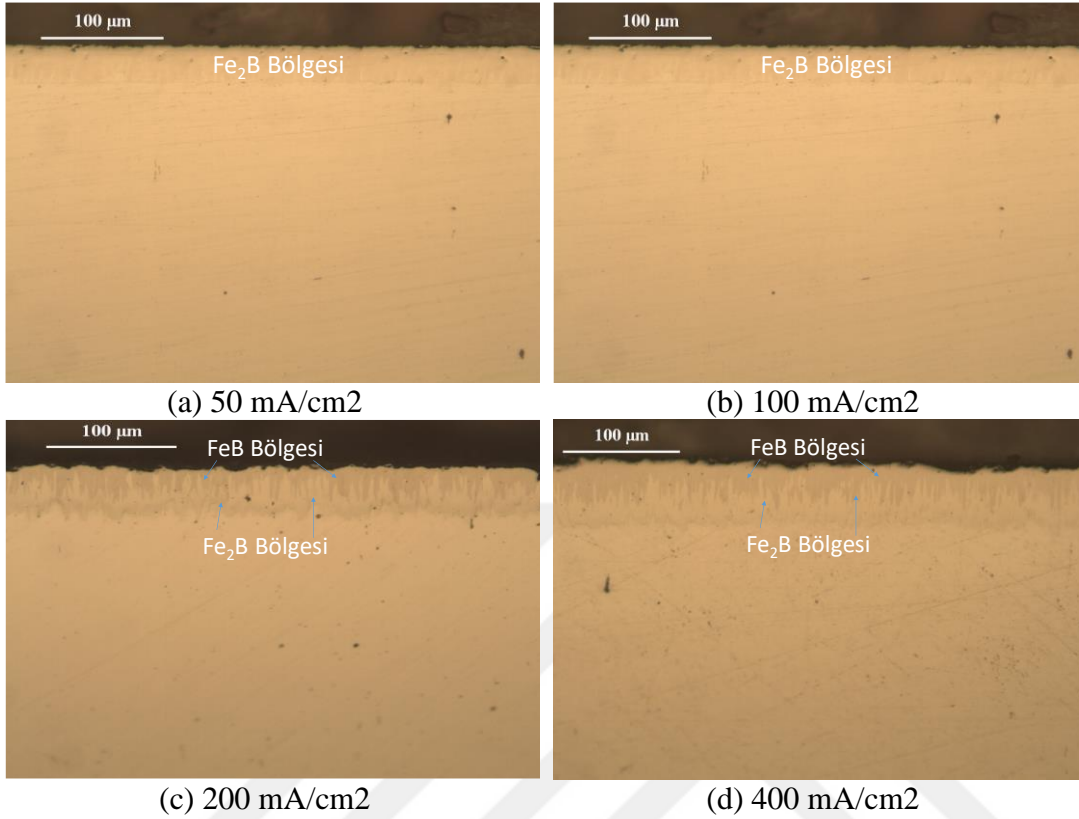
neticesinde, 50 mA/cm² akım yoğunluğunun çeliği katodik olarak yeteri kadar koruyamadığı ve yüzeyde oksit tabakasının oluştuğu belirlenmiştir. 100-200-400 mA/cm² akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneylerde ise FeB ve Fe₂B fazlarının birlikte oluştuğu tespit edilmiş ve akım yoğunluğu arttıkça FeB fazının pik şiddeti artarken Fe₂B fazının pik şiddetinde azalma meydana gelmiştir. Faraday kanununa göre artan akım yoğunluğu ile birlikte yüzeyde redüklenen bor miktarı artmaktadır ve bu doğrultuda akım yoğunluğunun arttıkça yüzeyde büyütülen borür tabakasının kalınlığının artması beklenmektedir.



Şekil 4.3: Farklı akım yoğunluklarında çelik malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film X-ışınları analizi. [950 °C, 15dk, %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Şekil 4.4’de verilen mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde, uygulanan tüm akım yoğunluklarında taban malzemeyi saran homojen bir borür tabakası büyütüldüğü belirlenmiştir. Uygulanan akım yoğunluğu arttıkça tabakadaki dişiler kapanmakta ve nispeten düz bir tabaka gözlemlenmektedir. 50 mA/cm² akım yoğunluğunda dişli bir borür tabakası oluşmuştur ve yapı içinde Fe₂B fazı gözlenmektedir. Artan akım yoğunluğuna bağlı olarak yapıda ki toplam borür tabakası içinde FeB fazı daha baskın olmuş ve toplam borür tabakası kalınlıkları artmıştır. 100 mA/cm² akım yoğunluğunda ki FeB fazı kesikli ve homojen olmayan bir yapı gösterir iken, 200 ve 400 mA/cm² akım yoğunluklarında FeB oluşumu sürekli hale gelmiştir. Farklı akım yoğunluklarında oluşan borür tabakalarının kalınlık değişimi şekil 4.5’de verilmiştir. Beklendiği üzere artan artan akım yoğunluğuna bağlı olarak FeB ve Fe₂B

tabakalarında artış olduğu görülmektedir. Toplam tabaka kalınlığı 27 μm 'den 54,8 μm 'ye, FeB tabaka kalınlığı ise 0'dan 28,2 μm kalınlığına çıkmıştır.

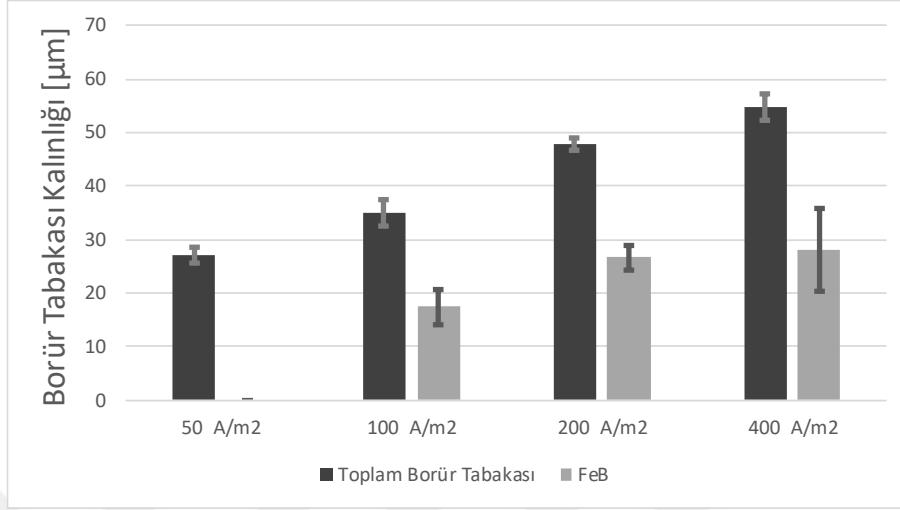


Şekil 4.4: Farklı akım yoğunluklarında borlanan numuların yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [950 °C, 15 dk, %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Toplam borür tabakası kalınlığının büyüme hızı artan akım yoğunluğu birlikte azalarak parabolik bir artış göstermiştir. Aynı şekilde FeB faz oluşumu da 50-100 mA/cm² arasında 15 mikron artmışken, 100 mA/cm²'den 400 mA/cm²'ye 13 mikron artarak parabolik bir artış göstermektedir.

Literatürde gerçekleştirilen farklı çeliklerin elektrokimyasal olarak borlanması akım yoğunluğu etkileri incelendiğinde, deneysel çalışma sonuçlarına benzer şekilde özellikle 200 mA/cm²'den sonra artan akım yoğunluğunun FeB ve Fe₂B tabakalarının büyüme hızını azalttığı ve dişli yapının bantsı yapıya dönüştüğü sonucuna ulaşılmıştır [45-47]. Kartal G'nin. [28] AISI 7114 çeliğini elektrokimyasal olarak borladığı çalışmada 200 mA/cm²'den yüksek akım yoğunluklarında (300-700 mA/cm²) toplam borür tabaka kalınlığının bir miktar azalma gösterdiğini ve büyütülen tabaka kalınlığının akım yoğunluğundan bağımsız olduğunu ve en kalın FeB tabakasının 200 mA/cm² koşulunda oluştuğunu belirtmiştir.

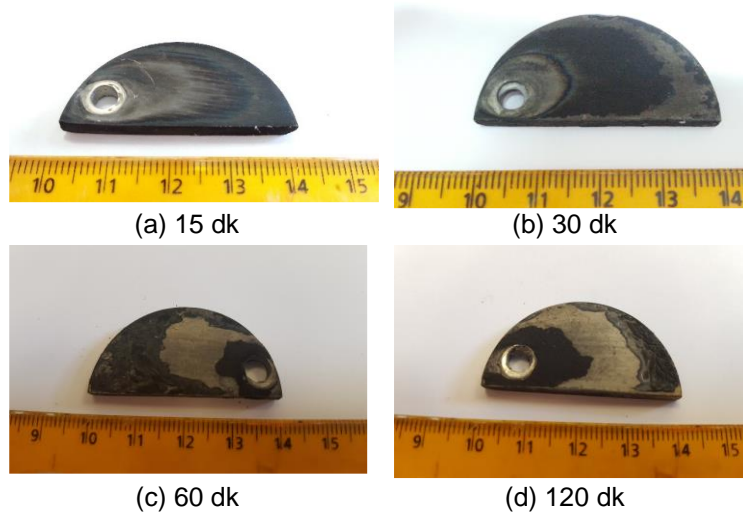
Bundan sonra gerçekleştirilen KRTD-Bor deneylerinde kalın tabaka büyötmek, daha önce ki gerçekleştirilmiş çalışmadan [34] veriler ışığında ve bu çalışmada elde edilen sonuçlara esas alınarak 200 mA/cm² ideal akım yoğunluğu olarak belirlenmiştir



şekil 4.5: Farklı akım yoğunluklarında borlanan numelerin kalınlık ölçümleri. [950 °C, 15 dk, %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

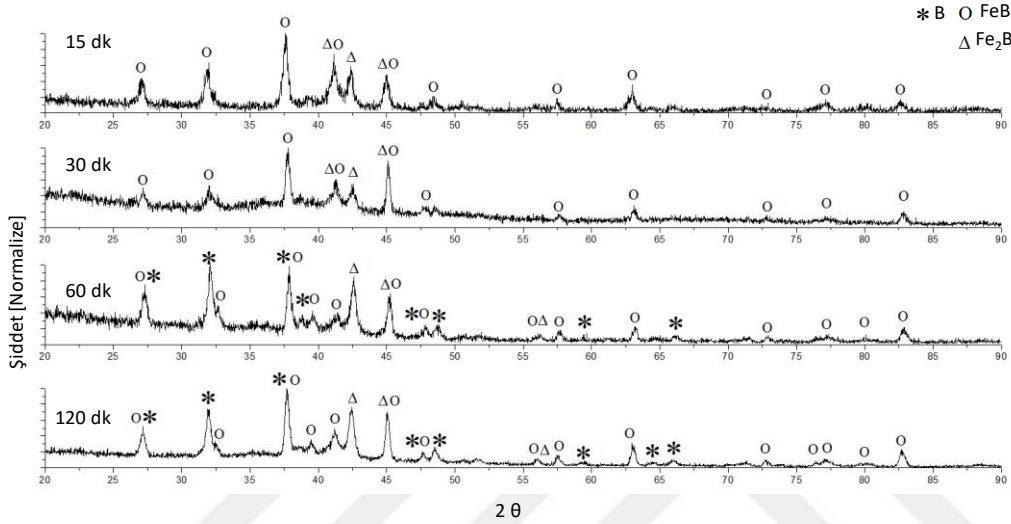
4.1.2 Elektroliz Süresinin Etkisi

Elektroliz süresinin çelik taban malzeme (AISI 8620) üzerinde oluşturulacak borür tabakasına etkilerini incelemek amacı ile 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 950 °C sıcaklığında elektroliz süresi sırası ile 15-30-60-120 dk olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Süre deneyleri sonucu elde edilen demir borür tabakalarının yüzey görünümleri şekil 4.6'da verilmiştir. Yüzey görünümleri incelendiğinde, 60 dk ve 120 dk borlanan numunelerin yüzeylerinde toz halde elementel bor olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6: Borlama süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri. [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

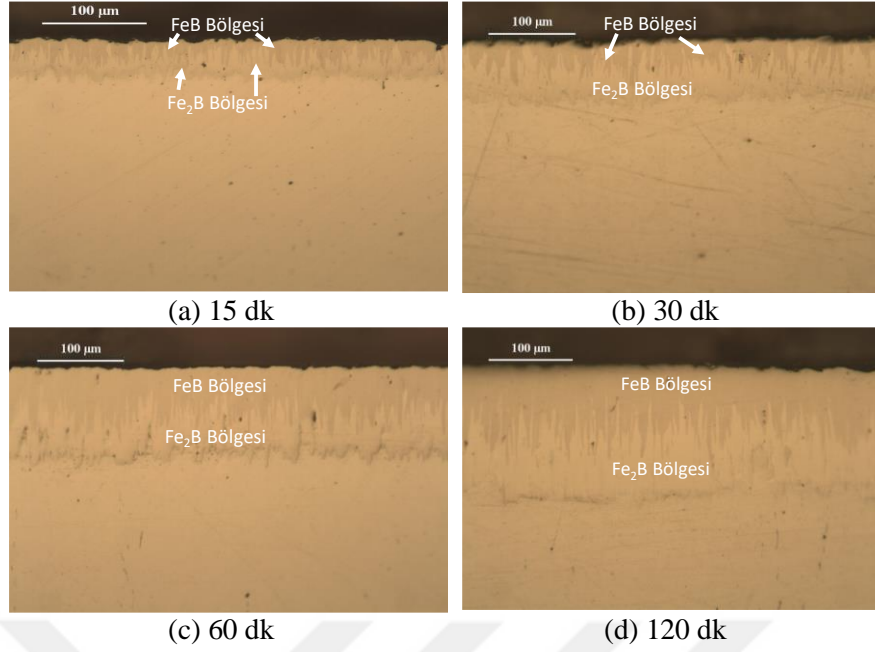
Yüzeyde bor oluşumu Şekil 4.7’de verilen ince film x-ışınları faz analizi sonucu ile uyumluluk göstermektedir. Ergimiş tuz elektrolizinin elementel bor oluşumu yöntemlerinden biri olduğu düşünüldüğünde taban malzeme üzerinde elementel bor oluşumu mümkündür [48,49] Faz analizinde de görüldüğü üzere 15 ve 30 dk süresince



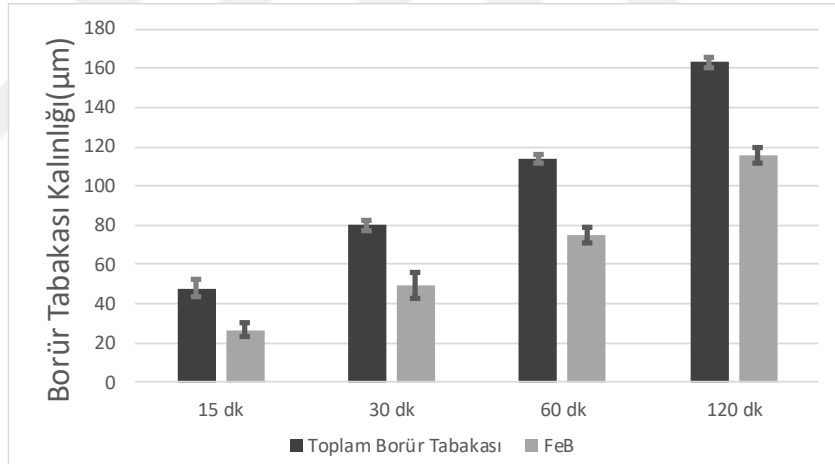
süresince çelik taban malzeme üzerinde FeB+Fe₂B iki fazlı demir borür tabakasının büyütüldüğü 60 ve 120 dk sürelerinde ise demir borür fazlarının yanında elementel bor oluştuğu belirlenmiştir.

Şekil 4.7: Farklı sürelerde çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasına ait ince film XRD analizi [950 °C, 15 dk, %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Şekil 4.8’de verilen mikro yapı incelemelerine göre taban malzeme üzerinde homojen olarak çift fazlı FeB ve Fe₂B tabakaları büyütülmüştür. Artan elektroliz süresi ile birlikte borür tabakası içerisinde ki FeB fazına ait dişlerin arttığı ve 15 dakikada büyüyen borür tabakası dişli bir yapıya iken 120 dk sonunda düz bir yapıya dönüştüğü görülmektedir. Çelik malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarının kalınlığının, borlama süresine bağlı olarak değişimi şekil 4.9’da verilmiştir. Beklendiği üzere artan artan akım yoğunluğuna bağlı olarak FeB ve Fe₂B tabakalarının kalınlığında artış olduğu görülmektedir. Borlama süresi 15 dakikadan 30 dakikaya çıkarıldığında FeB ve toplam tabaka kalınlığı yaklaşık 2 katına çıkarken, 30 dakikadan daha uzun sürelerde borlanan numunelerde ki tabaka kalınlığı artış hızında azalma mevcuttur. Toplam tabaka kalınlığı 30 µm’den 160 µm ‘ye , FeB tabaka kalınlığı ise 50 µm’ dan 160 µm kalınlığına çıkmıştır



Şekil 4. 8: Farklı sürelerde borlanan çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [950 °C, 200 mA/cm², [%90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]



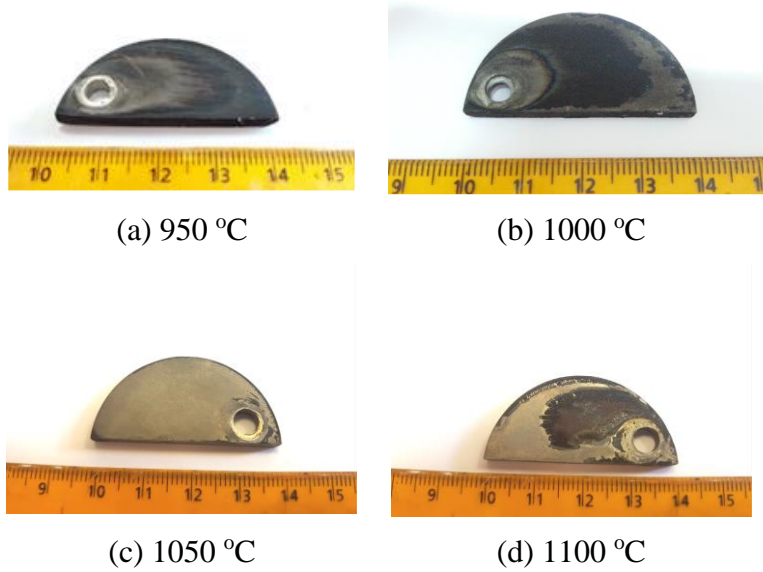
Şekil 4. 9: Farklı sürelerde borlanan çelik taban malzemelerin yüzeylerinde büyütülen borür tabakalarının kalınlıklarındaki değişim. [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Kartal G.'nin [28] 7114 çeliğini 200 mA/cm² akım yoğunluğunda, 900 °C ve 1-5-10-15-30-60-90-120 dk koşullarında elektrokimyasal olarak borladığı çalışmada, benzer bir şekilde 30 dakikadan sonraki sürelerde(60-90-120 dk) tabaka kalınlığının artış hızının oldukça yavaşladığını ve FeB ve Fe₂B fazlarının farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması nedeni ile 10 dakika üzerinde ki deney koşullarında elde ettiği borür tabakasında çatlamların olduğunu belirtmiştir. Kartal G ve arkadaşlarının [33] AISI 1018 çeliğini 200 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı sıcaklık ve sürelerde

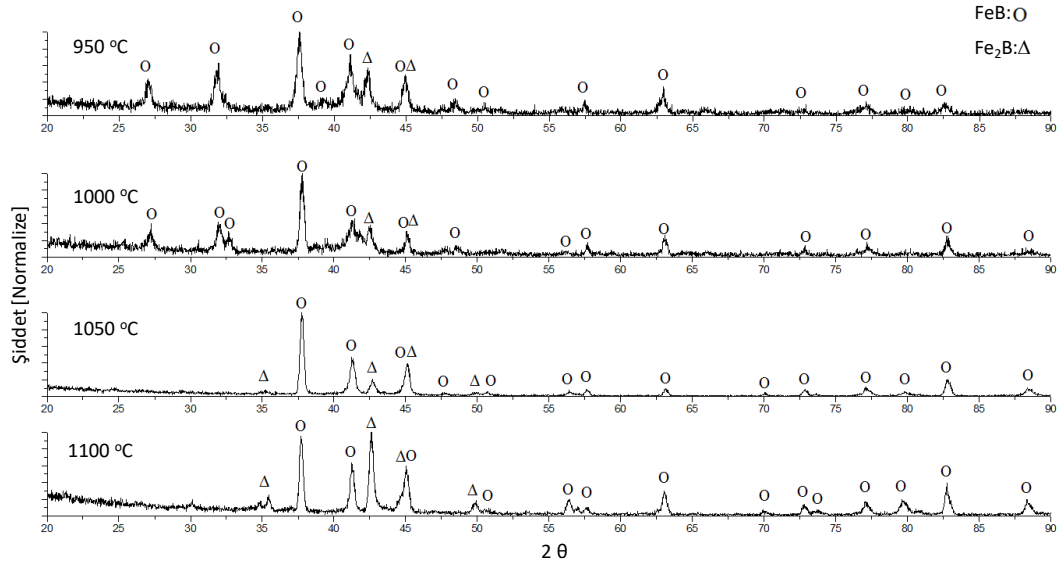
borladıkları çalışmada, 5 dk gibi kısa sürede gerçekleştirilmiş borlama işlemi sonucunda dahi, oldukça kalın ve homojen bir borür tabakası büyütüldüğünü 900-1000 °C 5 dk sürede büyütülen borür tabakası içinde Fe₂B fazının daha baskın olduğunu tespit etmişler, ve daha uzun sürelerde (>15 dk) büyütülen borür tabakasının Fe₂B ve FeB fazlarını birlikte içerdiğini belirtmişlerdir. Aynı şekilde, artan proses süresi ile birlikte büyütülen borür tabaka kalınlığının arttığını ve 120 dk borlama işlemi sonucunda çelik taban malzeme üzerinde ortalama 250 µm kalınlığında borür tabakası büyütüldüğünü ifade etmişlerdir.

4.1.3 Elektroliz Sıcaklığının Etkisi

Tüm difüzyon kontrollü proseslerde olduğu üzere, sıcaklık borür tabakası oluşumunda da etkili bir parametredir. Elektroliz sıcaklığının AISI 8620 çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasına olan etkilerini incelemek amacı ile 15 dk elektroliz süresi ve 200 mA/cm² akım yoğunluğu sabit tutularak 950-1000-1050-1100 °C elektroliz sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık deneyleri sonucu çelik malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarına ait genel görünüm şekil 4.10'da verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda borlanmış çelik malzemelerin yüzeyinde büyütülen borür tabakasına ait ince film x-ışınları faz analizi şekil 4.11'de verilmiştir. Gerçekleştirilen tüm sıcaklıklarda çelik malzeme üzerinde iki fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakası büyütüldüğü tespit edilmiştir.

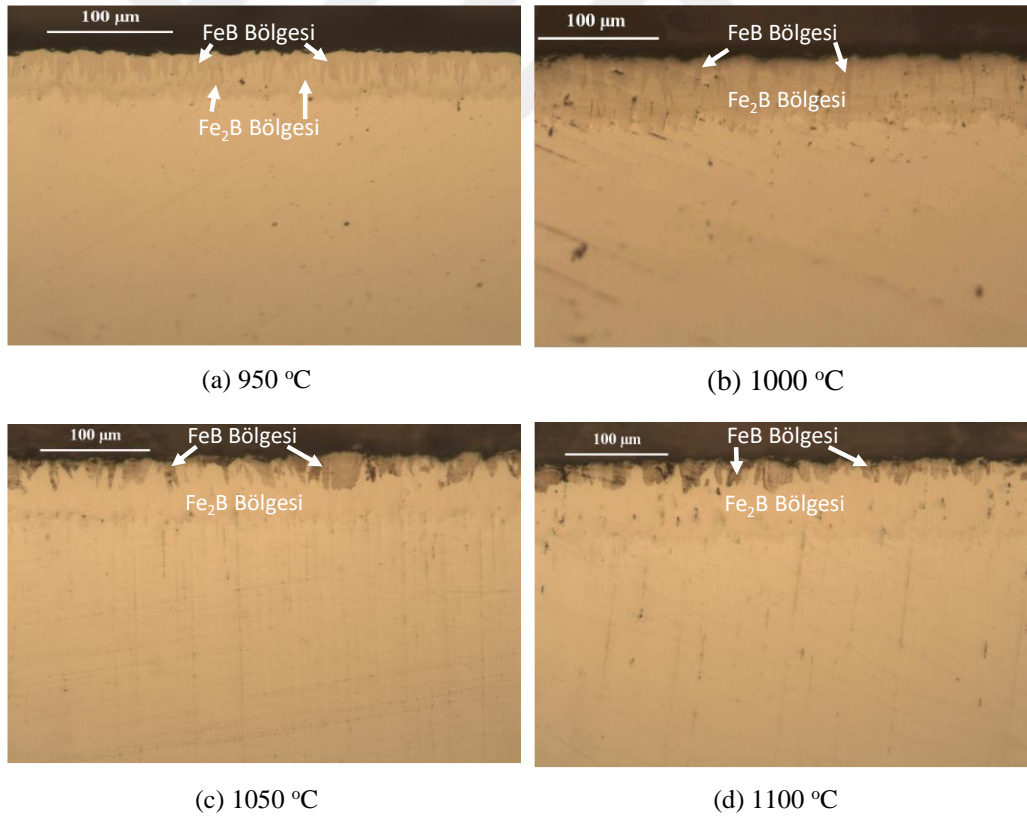


Şekil 4.10: Elektroliz sıcaklığına bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünümleri. [15 dk, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]



Şekil 4.11: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik malzemelerin ince film XRD analizleri. [200 mA/cm², 15 dk, %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Elektroliz sıcaklığına bağlı olarak büyütülen borür tabaklarının kesit alan mikro yapı incelemeleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik malzemelerin yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı fotoğrafları. [15 dk, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Mikro yapı görüntülerinde açıkça görüldüğü üzere tüm sıcaklık deneyleri sonucunda çelik taban malzeme üzerinde Fe₂B ve FeB çift fazlı borür yapısı büyütülmüştür. Daha önce de ifade edildiği üzere sıcaklığın difüzyon kontrollü proseslerde etken bir parametre olması denklemi verilen Arrhenius eşitliğinde de görülmektedir [28].

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

D = Difüzyon katsayısı (cm²/s)

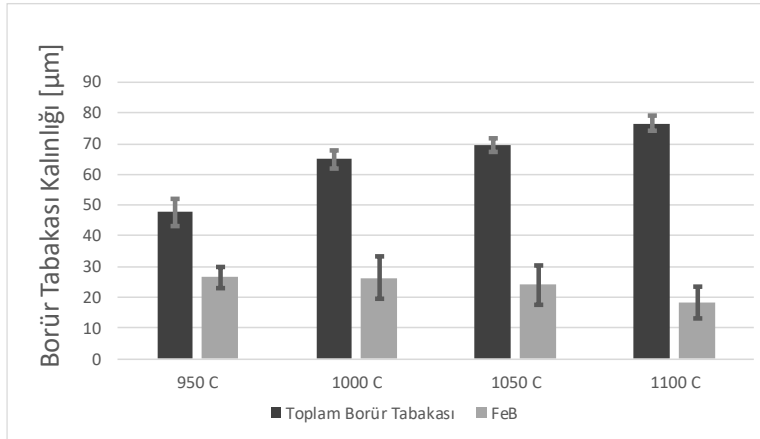
Q = Aktivasyon enerjisi (J/mol)

D₀ = Sabit (cm²/s)

R = Gaz sabiti (J/mol.K)

T = Sıcaklık (Kelvin)

Bu doğrultuda artan proses sıcaklığı ile birlikte bor atomlarının taban malzeme yüzeyine olan difüzyon hızının artması neden ile, borür tabakasının kalınlığı artmış ve FeB fazının dişli yapısı kısmen azalmıştır. Şekil 4.13’de verilen, sıcaklığa bağlı borür tabakasına ait kalınlık grafiği incelendiğinde, beklendiği üzere artan sıcaklıkla toplam borür tabakası artmıştır. Borür tabakası kalınlığı 950’de 45 µm iken 1100 °C’de 80 µm olarak büyütülmüştür. Ancak, 1000 °C’den yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen borlama deneylerinde FeB tabakasının kalınlığında azalma tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni, artan sıcaklığa bağlı olarak, çelik matrisin içerisinde ki bor atomlarının difüzyon hızının 1000 °C’den sonra çelik malzeme yüzeyinde ki redüksiyondan daha hızlı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.13: Farklı sıcaklıklarda borlanan çelik numuların yüzeylerinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [15 dk, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

G. Kartalın [28] 7114 çeliğini 200 mA/cm² akım yoğunluğunda, 1 saat süre ile 800-900-1000 °C koşullarında elektrokimyasal olarak borladığı çalışmada, 800 ile 1000 C arasında artan sıcaklıkla toplam borür tabakası ve FeB tabakasının kalınlığının ve toplam borür tabakası içinde oluşan FeB tabakası oranının arttığını belirtmiştir.

Kartal G ve çalışma arkadaşlarının [33] AISI 1018 çeliği üzerinde 200 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, büyütülen borür tabakasının kinetik olarak inceledikleri çalışmada; proses sıcaklığının bor atomunun difüzyonu üzerinde oldukça etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük sıcaklıklarda bor atomunun difüzyon hızının oldukça düşük olduğunu, bu nedenden dolayı, $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 dk sonucunda FeB ve Fe₂B fazları birlikte oluşurken, daha yüksek sıcaklıkta ($900\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) Fe₂B fazının büyütülen borür tabakasında daha baskın olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, düşük sıcaklıkta ($850\text{-}900^\circ\text{C}$) gerçekleştirilen borlama deneylerinde, çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakasının nispeten daha düz ve bantsı bir yapıda oluştuğu gözlemlenirken, artan sıcaklık ile birlikte ($950\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) büyütülen borür tabakasının dişli yapıya dönüştüğünü ifade etmişlerdir.

4.1.4 KRTD-Bor ile vites dişli çeliği üzerinde tek fazlı borür tabakası büyütülmesi

Endüstriyel olarak talep edilen tek fazlı homojen borür tabakası elde etmek için KRTD-Bor yöntemi kapsamında, borlanmış numuneye borlama işlemine ek olarak faz homojenleştirme işlemi uygulanması gerekmektedir. Faz homojenleştirme işlemi FeB fazının Fe₂B fazına dönüşüm işlemi tanımlamaktadır. Faz homojenleştirme işlemi ergimiş tuz elektrolizi ile borlama işleminin tamamlanmasından sonra borlanmış numunenin borlama işleminin gerçekleştirildiği sıcaklıkta ve aynı bileşime (%90 Na₂B₄O₇ ve %10 Na₂CO₃) sahip elektrolitte akımın kesilip anot katot polarizasyonunun durdurularak bekletilmesiyle uygulanır [1]

4.1.4.1 950 °C'de gerçekleştirilen KRTD-Bor deneyleri

Vites dişlisi çeliği üzerinde tek fazlı Fe₂B bileşiminde demir borür tabakası büyütme için önceki kısımda gerçekleştirilen borlama işlemine ek olarak; 15 dakika elektroliz işleminin ardından, anot ve katot polarizasyonu kesilerek numune, elektrolit içerisinde, 45 dakikadan başlanarak, 5'er dakika FH süreleri artırılarak tek fazlı Fe₂B borür tabakası elde edilene kadar faz homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 200 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz işlemine ek olarak gerçekleştirilen ilave faz homojenleştirme neticesinde çelik taban malzeme üzerinde büyütülen demir borür tabakalarının genel görünümleri Şekil 4.14'de verilmiştir.



(a) 15 dk Elektroliz



(b) 45 dk FH



(c) 50 dk FH



(d) 55 dk FH



(e) 60 dk FH



(f) 65 dk FH



(g) 70 dk FH



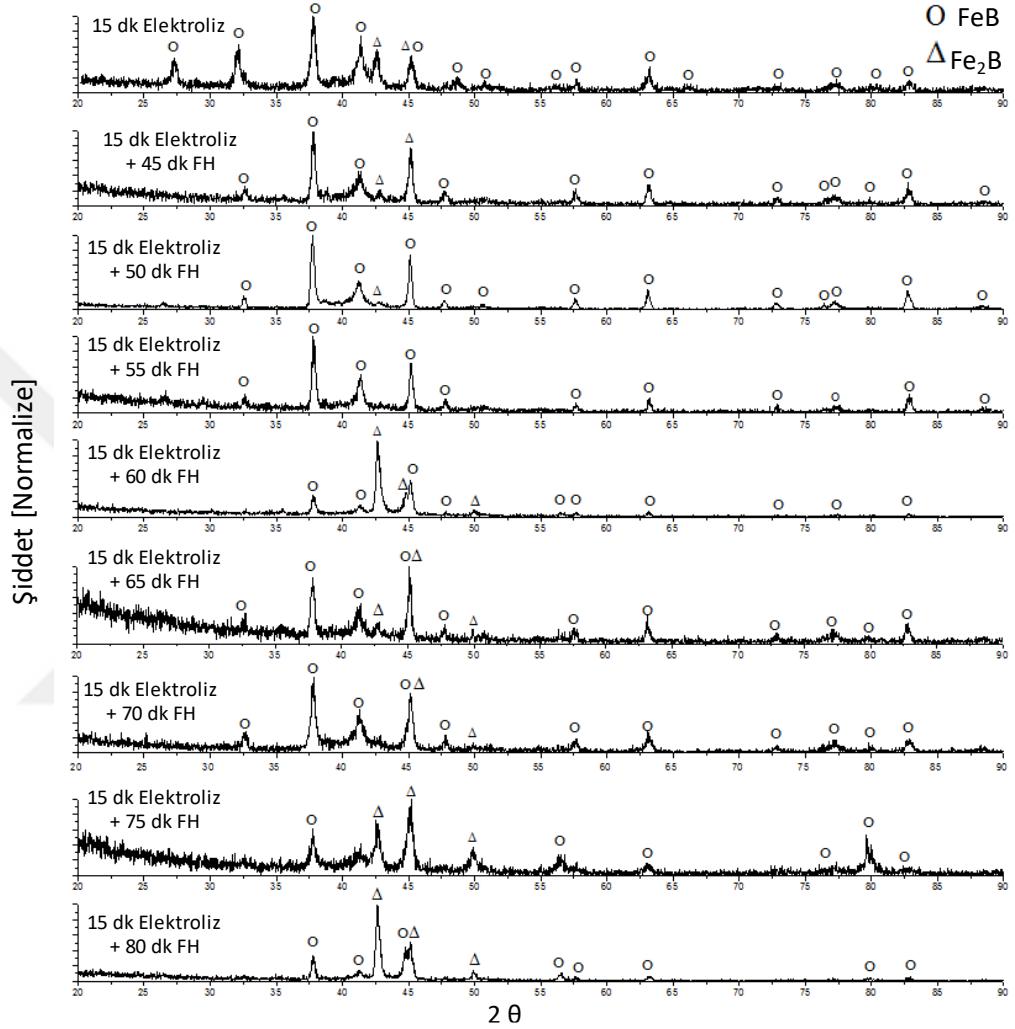
(h) 75 dk FH



(i) 80 dk FH

Şekil 4.14: 15 dk elektroliz ve ilave FH işlem sürelerine bağlı olarak, çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri [$90\% \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10\% \text{Na}_2\text{CO}_3$, $950\text{ }^\circ\text{C}$, $200\text{mA}/\text{cm}^2$]

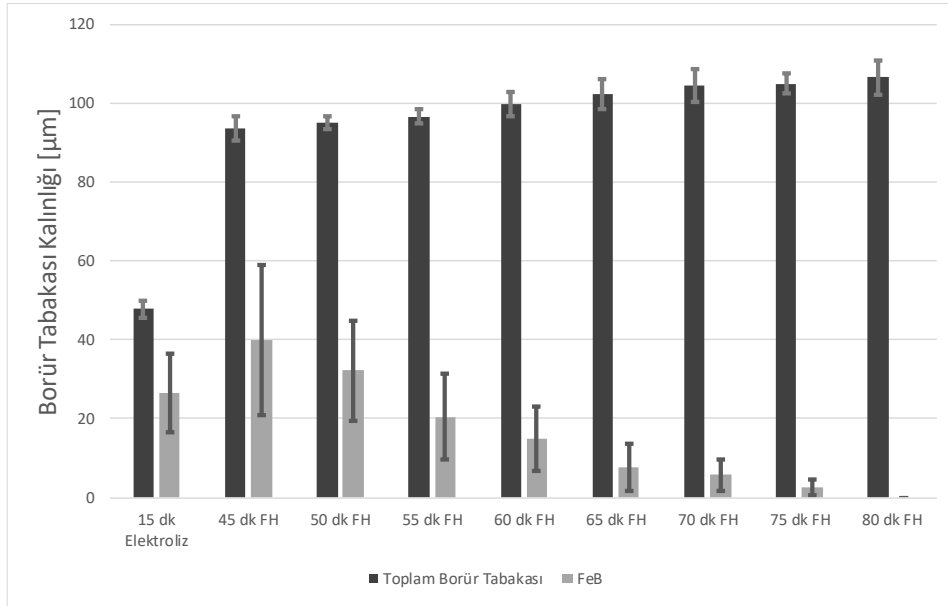
Şekil 4.15’de verilen faz homojenleştirme sürelerine bağlı olarak, çelik taban malzeme üzerinde oluşan borür yapılarının ince film x-ışınları analizi incelendiğinde, artan FH süresine bağlı olarak FeB fazına ait pik şiddetleri azalmaktadır. Gerçekleştirilen x-ışınları analizi 2° giriş açısıyla ince film olarak yapıldığından dolayı, yüzey de çok ince FeB fazı oluşması durumunda dahi FeB piklerini vermektedir.



Şekil 4.15: Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film XRD analizleri [950 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Faz homojenlerine bağlı olarak çelik taban malzeme üzerinde büyütülen demir borür tabakalarının kalınlık değişimine ait grafik Şekil’4.16 da verilmiştir. Artan faz homojenleştirme süresi ile birlikte, çelik matrisi içinde bulunan bor atomlarının sıcaklık itici gücü ile çelik taban malzeme içerisine difüze olması için tanınan süre artmaktadır. Bu doğrultuda artan süreye bağlı olarak toplam borür tabakasının kalınlığı artarken FeB tabakasının kalınlığı azalmıştır. FH deneyleri sonucunda 950 °C’de 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dakika borlama işlemine ilave olarak gerçekleştirilen

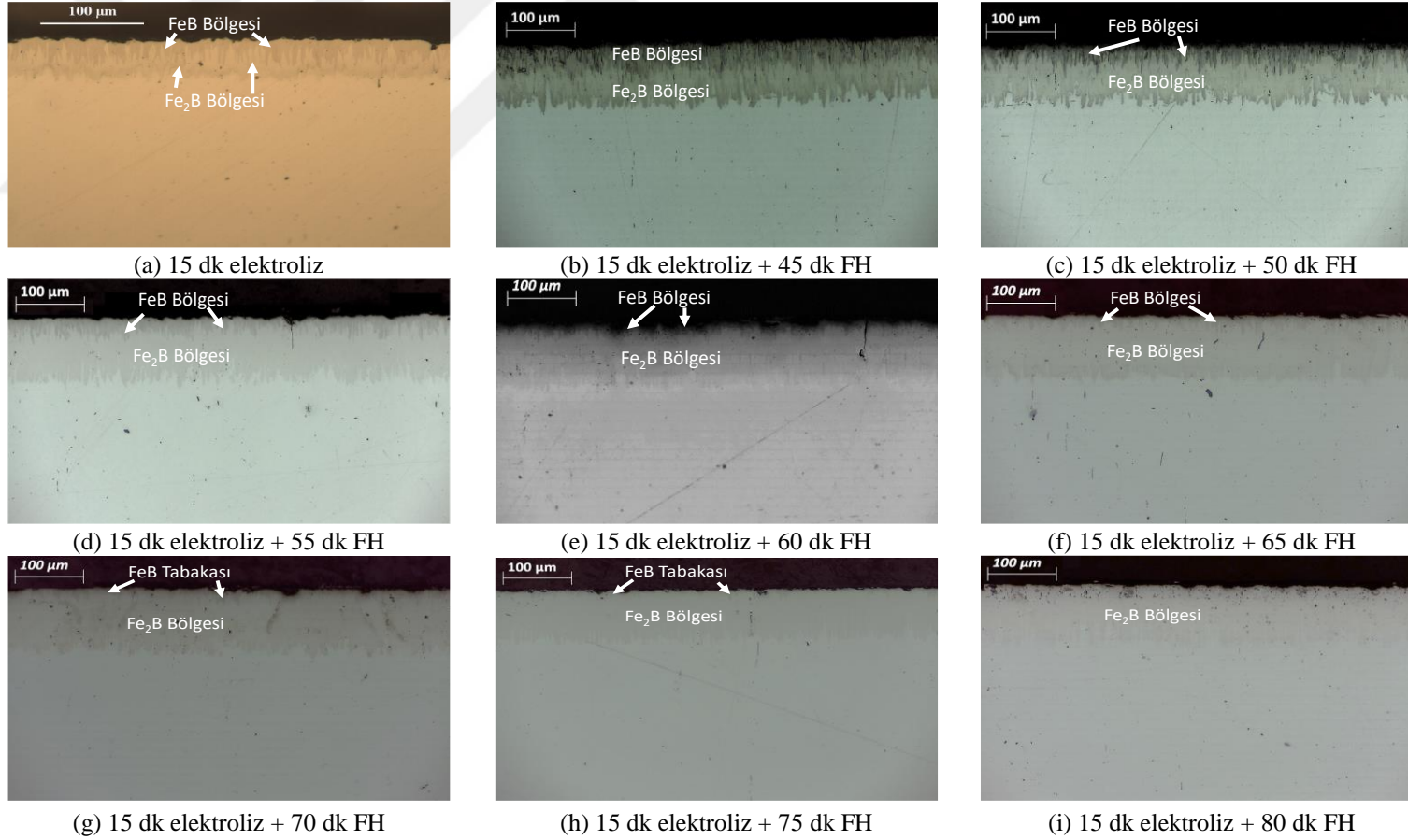
80 dk FH işlemleri ile AISI 8620 çelik taban malzeme üzerinde ortalama 115 µm kalınlığında tek fazlı Fe₂B bileşiminde borür tabakası büyütülmüştür.



Şekil 4.16: FH süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Şekil 4.17’de, gerçekleştirilen ilave FH deneyleri sonucunda büyütülen demir borür tabakalarının mikro yapı görüntüleri verilmiştir. 60 dakika FH işlemine kadar oldukça belirgin ve homojen FeB tabakası 60 dakikalık FH işleminden sonra süreksiz bir hal almış ve 70 dakikalık FH işleminden sonra FeB fazı borür tabakası içerisinde kısmi bölgelerde kalmıştır. 80 dakikalık FH işleminden sonra borür tabakası içerisinde FeB fazının tespit edilemeyecek düzeyde azaldığı belirlenmiştir.

KRTD-Bor yöntemi ile çelik yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının çelik taban malzemeye olan yapışmalarını incelemek için The Daimler-Benz Rockwell C testi uygulanmıştır. Şekil 4.18’de uygulanan The Daimler Benz Rockwell C testine ait indentasyon izleri verilmiştir. İndentasyon izlerinin değerlendirilmesinde Ek A’da verilen HF1- HF6 arasında değişen Mercedes Benz yapışma tablosu kullanılmıştır. İndentasyon izleri incelendiğinde borür tabakasında ki azalan FeB fazı miktarı ile birlikte yapışma özelliğinin iyileştiği anlaşılmaktadır. Sadece 15 dakika elektroliz uygulanmış numune HF5 kötü kalite yapışma özelliği göstermektedir. FeB fazının ortalama 10 µm ve süreksiz bir tabakaya indirildiği deney koşullarında yapışma testi sonucu numuneler kabul edilebilir kalite de HF3 ve üzeri yapışma özelliği göstermiştir. En iyi kalite (HF1) yapışma özelliğini 15 dk elektroliz ve ilave 80 dk FH sonucunda büyütülen borür tabakası göstermiştir.



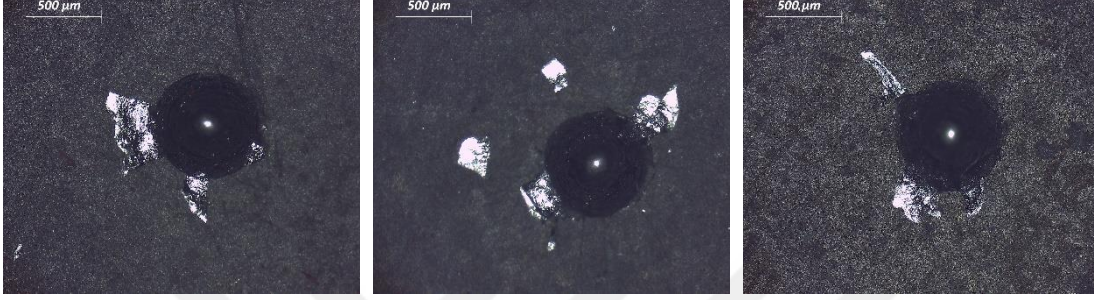
Şekil 4.17: Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarının kesit alan mikro yapı incelemesi [950 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + % 10 Na₂CO₃]



(a) 15 dk Elektroliz

(b) 15 dk Elektroliz + 45 dk FH

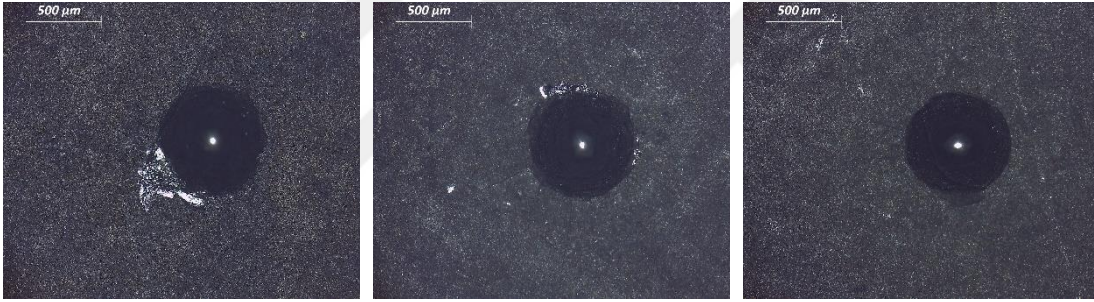
(c) 15 dk Elektroliz + 50 dk FH



(d) 15 dk Elektroliz + 55 dk FH

(e) 15 dk Elektroliz + 60 dk FH

(f) 15 dk Elektroliz + 65 dk FH



(g) 15 dk Elektroliz + 70 dk FH

(h) 15 dk Elektroliz + 75 dk FH

(i) 15 dk Elektroliz + 80 dk FH

Şekil 4.18: Farklı sürelerde KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell C yapışma testi sonrası indentasyon izleri, [950 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

4.1.4.2 1000 °C'de gerçekleştirilen KRTD-Bor deneyleri

AISI 8620 vites dişli çeliği taban malzemesi üzerinde 15 dk elektroliz ve ilave 80 dk FH işlemi sonucunda tek fazlı Fe₂B tabakası büyütülmüştür. Toplam 95 dk olan uzun proses süresini kısaltmak amaçlı KRTD-Bor deneyleri 1000 °C de yapılmıştır. 200 mA/cm² ideal akım yoğunluğunda 15 dk süre ile 1000 °C'de elektroliz gerçekleştirilmiş ve ardından FH işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.19'da çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarının genel görünümleri verilmiştir. 40 dk FH işleminden sonra numune gri renk almıştır.



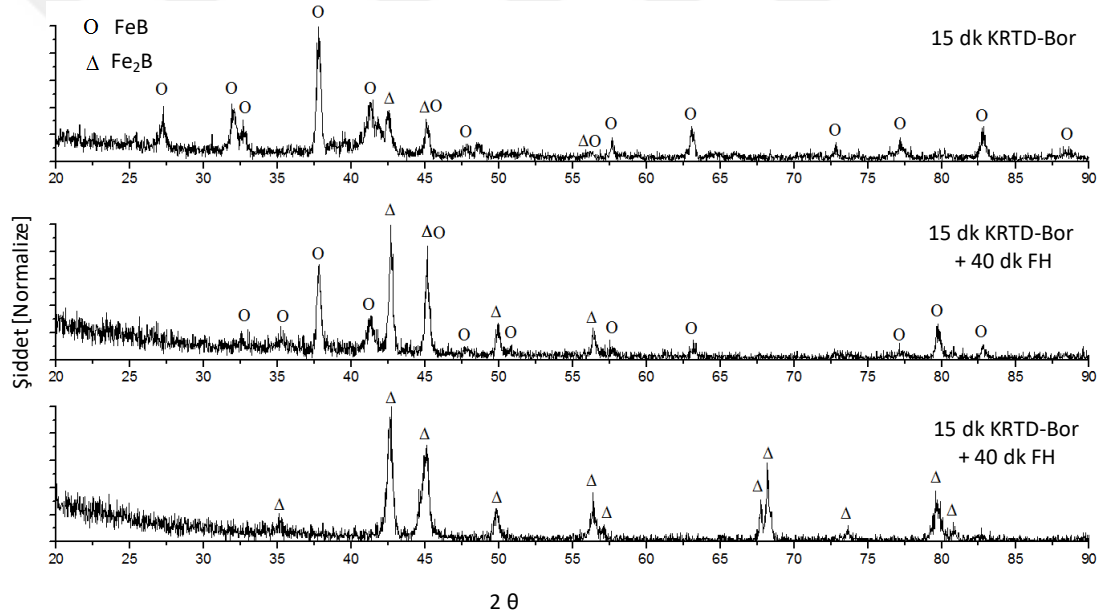
(a) 15 dk Elektroliz

(b) ilave 40 dk FH

(c) ilave 45 dk FH

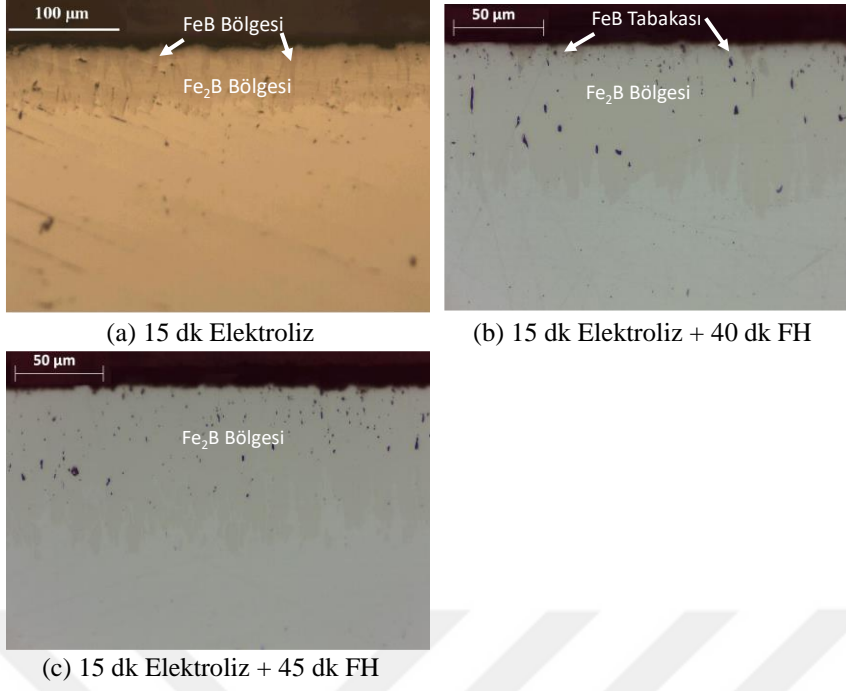
Şekil 4.19: 15 dk elektroliz ve ilave FH işlem sürelerine bağlı olarak, çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının genel görünüşleri. [%90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃, 1000 °C, 200mA/cm²]

Çelik taban malzeme üzerinde büyütülen borür tabakalarına x-ışınları analizi Şekil 4.20 de verilmiştir. X-ışınları analizi incelendiğinde 40 dk FH uygulanan numunede, FeB fazına ait piklerin şiddeti azalmış, 45 dk FH ardından FeB fazı Fe₂B fazına dönüştürülerek tek fazlı homojen Fe₂B tabakası elde edilmiştir.



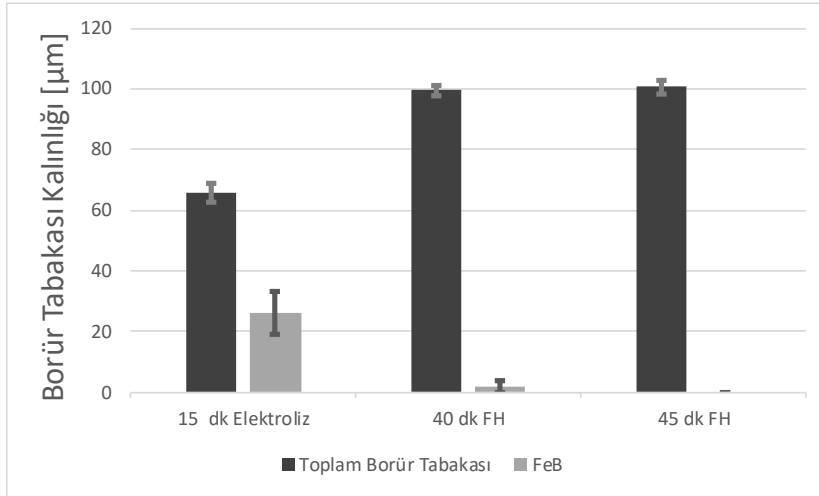
Şekil 4.20: Farklı FH sürelerinde çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarına ait ince film XRD analizleri [1000 °C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Şekil 4.21’de verilen borür tabakalarına ait mikro yapılar incelendiğinde. 15 dk borlamanın ardından ilave 40 dk FH uygulanan numune de, süreksiz ve bölgesel FeB tabakaları oluştuğu tespit edilmiştir. 45 dk FH uygulanmasının ardından x-ışınları analizinde de görüldüğü üzere tek fazlı homojen Fe₂B tabakası toplam 1 saat proses sonucunda büyütülmüştür.



Şekil 4.21: Farklı FH sürelerinde AISI 8620 çeliği yüzeyinde büyütülen borür tabakasının kesit alan mikro yapı incelemeleri [1000°C, 200 mA/cm² %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

Borür tabakasına ait kalınlık ölçümleri Şekil 4.22’de verilmiş olup, beklenildiği üzere, artan FH süresi ile beraber toplam borür tabakası kalınlığının arttığı ve FeB tabakasına ait kalınlığın azaldığı görülmektedir. 15 dakika elektrolizin ardından toplam borür tabakası kalınlığı ortalama 60 µm ölçülürken ilave 45 dk FH sonrası ortalama 100 mikron olmuştur. Gerçekleştirilen deneyler sonrası, 1000 °C’de 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz ardından ilave 45 dk FH işlemi sonrası ortalama 100 µm kalınlığında tek fazlı homojen Fe₂B tabakası AISI 8620 vites dişlisi çeliği üzerinde büyütülmüştür.

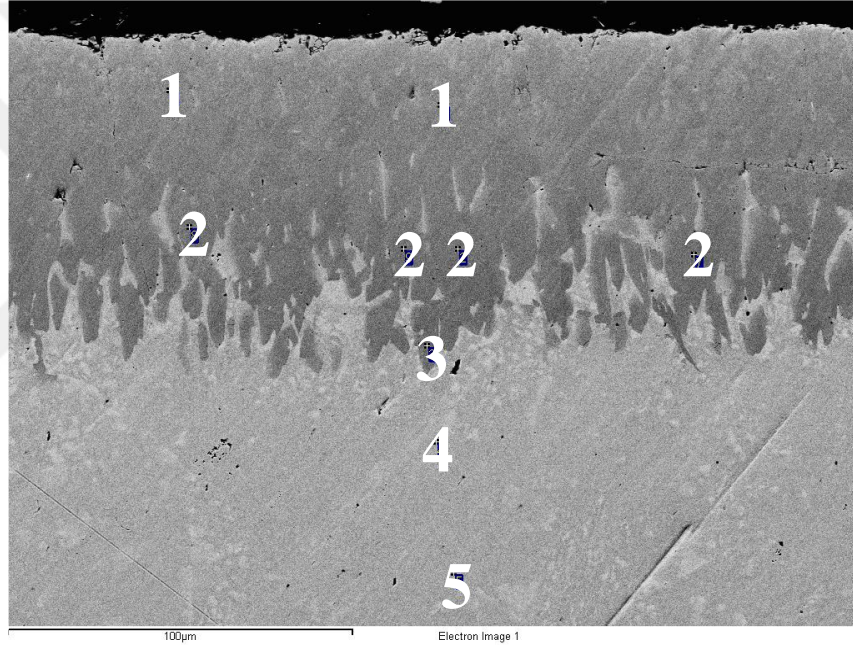


Şekil 4. 22: FH süresine bağlı olarak çelik taban malzeme yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının kalınlık değişimi. [1000 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

İdealize edilen koşullarda, malzeme yüzeyinde ki elementlerin borür tabakası boyunca dağılımını incelemek amacı ile taramalı elektron mikroskopunda noktasal elementel analizi yapılmıştır. Analiz için borür tabakasından alınan noktalar Şekil'4.23'de, bu noktalarda gerçekleştirilen analiz sonuçları da Çizelge 4.3'de verilmiştir.

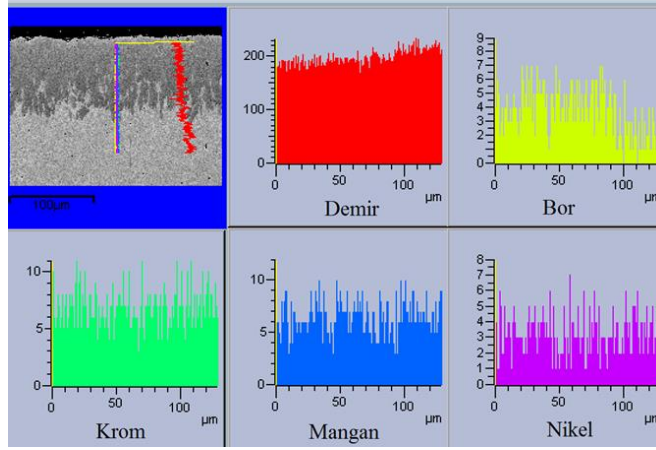
Çizelge 4.3: 15 dk elektroliz ve 45 dk FH sürelerinde AISI 8620 çelik yüzeyinde büyütülen borür tabakalarının SEM noktasal elementel analiz sonuçları.

Nokta	B	Fe	C
1	27,75	72,25	-
2	36,25	63,75	-
3	37,07	62,93	-
4	19,91	59,91	19,19
5	15,85	65,60	17,56



Şekil 4. 23: 15 dk elektroliz ve 45 dk FH sürelerinde AISI 8620 çelik yüzeyinde büyütülen borür tabakasının SEM görüntüsü.

SEM noktasal element analiz sonuçları incelendiğinde, 1. noktada 27,75 B varken, tabakanın içlerine doğru bor miktarı artmaktadır . 1. 2.- 3. Noktalarda ki Fe ve B miktarları yaklaşık olarak Fe_2B fazına ait değerlerle örtüşmektedir. 4. ve 5. noktalarda ise tabakasının dışında olmasına rağmen o bölgelerde bor elementinin difüze olduğu ve çelikte bulunan karbonun yüzeyden matris içine sürülmesine,böylelikle borür tabakası altında karbonca zengin bölge oluşturduğu belirlenmiştir. Şekil 4.24'de verilen borür tabakası üzerinde ki çizgisel element analizinde ise borür tabakası içinde krom,mangan ve nikelin homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

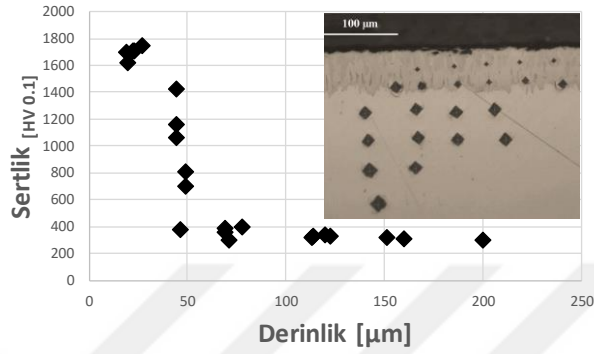


Şekil 4.24: 1000 °C’de 15 dk KRTD-Bor + 45 dk FH uygulanan çizgisel element analizi sonuçları [200 mA/cm²%90 Na₂B₄O₇ +%10 Na₂CO₃]

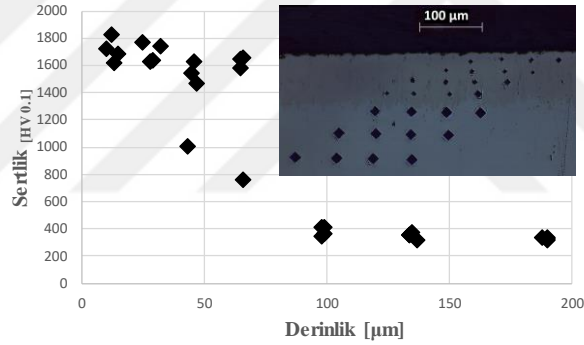
1000 °C’de sadece 15 dk borlama sonucunda elde edilen çift katmanlı borür tabakasına (FeB ve Fe₂B) ve 15 dk borlama işleminin ardından 45 dk FH işlemi sonucu oluşturulan tek fazlı (Fe₂B) borür tabakasına sertlik dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilen sertlik testleri sonuçları Şekil 4.25’de verilmiştir. İki katmanlı borür tabakasının yaklaşık 20 μm kalınlıkta olan üst yüzeye yakın kısmında, FeB tabakası bulunması nedeniyle daha yüksek sertlik değerleri (1750±50 HV) söz konusu iken toplam borür tabakası kalınlığının sertliği taban malzemeye doğru keskin bir şekilde düşmektedir. Ancak 45 dk FH işlemi ile daha homojen ve daha kalın olarak oluşan borür tabakasının sertliği 1600±100 HV değerleri arasında değişmekte olup, taban malzemeye doğru daha dengeli bir şekilde azalmaktadır. Dişli uygulamaları gibi yüzey yorulmalarına maruz kalan kullanımlarda, sert tabakadan aniden yumuşak tabakaya geçilmesi istenmeyen bir durumdur. AISI 8620 çelik malzeme yüzeyinde tek fazlı Fe₂B tabakası büyütülerek, bu durum bertaraf edilmiştir.

Bu tez kapsamında AISI 8620 vites dişli çeliğinin üzerinde büyütülen borür tabakası sertliği, diğer çalışma gruplarının [26,27,38-44] farklı prosesler ile borladığı AISI 8620 vites dişli çeliği üzerinde elde ettikleri borür tabakası sertliği ile uyuşmaktadır. Ayrıca klasik yöntemle borlama işlemi gerçekleştirilmiş çalışmalar ile karşılaştırıldığında KRTD-Bor yöntemi ile daha kısa sürede daha kalın borür tabakası büyütülmüş ve büyütülen borür tabakası tek fazlı Fe₂B bileşimindedir [26,27,38-44]. 1000 C’de gerçekleştirilen farklı sürelerde KRTD-Bor ve FH işlemi gören çeliklere uygulanan Daimler-Benz Rockwell C yapışma testi indentasyon görüntüleri Şekil 4.26’da verilmiştir. Daha önce ki kısımda da ifade edildiği üzere, FeB fazının yüksek miktarda olduğu 15 dk elektroliz koşulunda numune HF5 kötü kalitede yapışma

özelliği göstermişken FeB fazının oldukça az seviyeye indirildiği durumda numune kabul edilebilir HF2 kalite de yapışma özelliği göstermiştir. 15 dk elektroliz ve ilave 45 dk FH uygulandığı durumda, çelik malzeme üzerinde büyütölen borür tabakası beklenildiği üzere mükkemmel derece HF1 kalite de yapışma özelliği göstermiştir, bu koşullarda büyütölen borür tabakasında FeB fazı mevcut olmayıp, tabaka tek fazlı Fe₂B bileşimindedir.

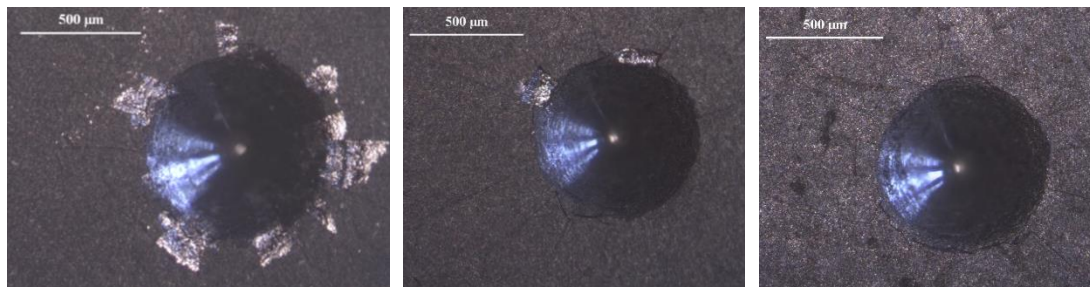


(a) 15 dk borlama



(b) 15 dk borlama ve ilave 45 dk FH

Şekil 4.25: Farklı KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çelik taban malzeme üzerinde büyütölen borür tabakasına ait kesit alan sertlik dağılımları. [1000 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]



(a) 15 dk Elektroliz

(b) 15 dk Elektroliz + 40 dk FH

(c) 15 dk Elektroliz + 45 dk FH

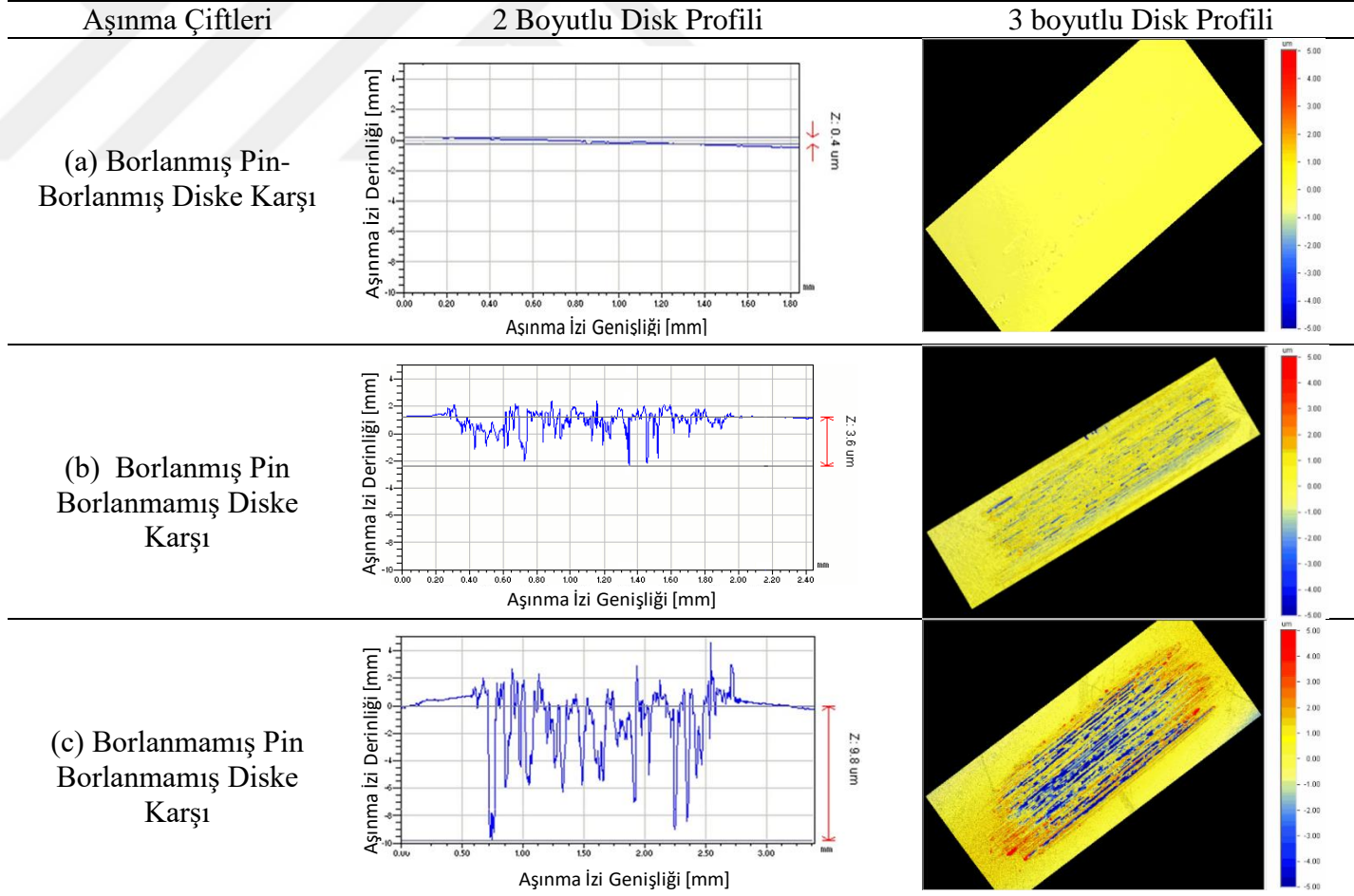
Şekil 4.26: Farklı sürelerde KRTD-Bor parametrelerinde borlanan AISI 8620 çeliğinin Daimler-Benz Rockwell C yapışma testi sonrası indentasyon izleri [1000 °C, 200 mA/cm², %90 Na₂B₄O₇ + %10 Na₂CO₃]

4.2 Aşınma Test Sonuçları

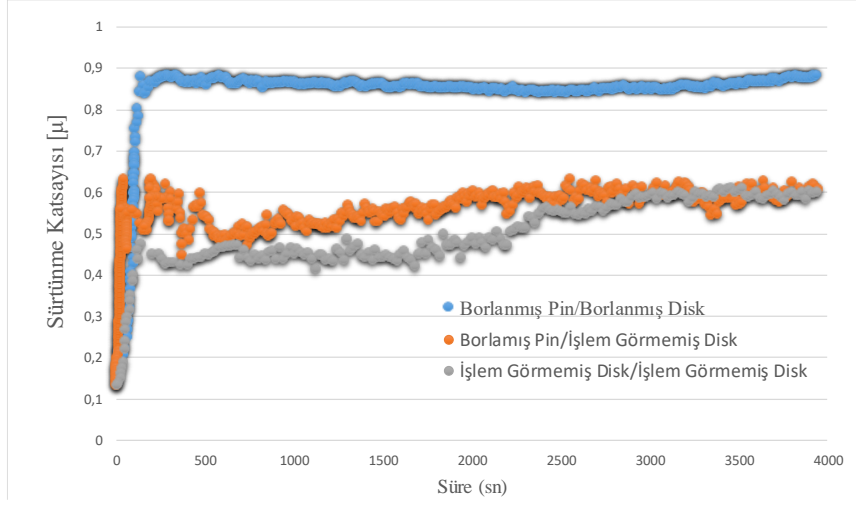
1000°C' de 15 dk elektroliz ve 45 dk FH işlemleri neticesinde, ideal olarak büyütülen 100 µm kalınlıkta, tek fazlı Fe₂B borür tabakasının aşınma özelliklerinin incelenmesi için, kuru ve yağlı ortamlarda pin-on-disk aşınma testleri gerçekleştirilmiştir

Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri, 5N yük uygulanarak, 2 cm/sn hızında 1 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Deneylemlerden sonra disklerin aşınan yüzeylerin iki ve üç boyutlu profillerine ait ölçümler Şekil 4.27'de verilmiştir. 2 ve 3 boyutlu disk profilleri incelendiğinde, borlanma işleminin AISI 8620 çeliğinin aşınma direncini artığı gözlenmiştir. En az aşınma borlanmış disk ve borlanmış pinde gözlenmiş olup maksimum aşınma derinliği 0,4 µm'dir. (Şekil 4.25-b). Sadece karşıt yüzeyin borlanması (pin malzemesinin) kuru ortamda aşınma özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.25-a). En derin aşınma profili, işlem görmemiş AISI 8620 ve pin çiftinde gözlenmiş olup maksimum aşınma derinliği 9,8 µm'dir. (Şekil 4.25-c).

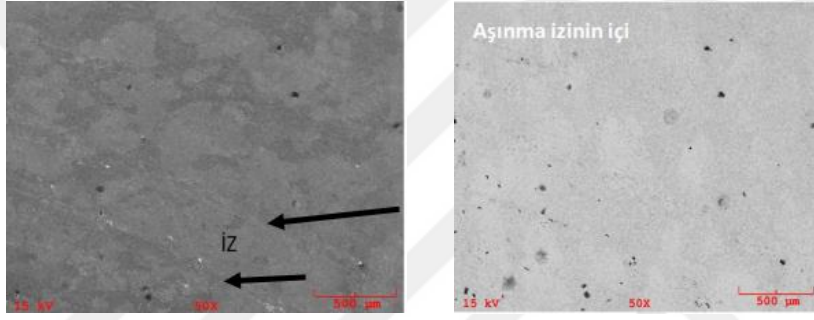
İlave olarak zaman bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir. Aşınma testi esnasında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri en düşük sürtünme disk katsayısının 0,6 değeri ile işlem görmemiş çifte ve borlu pin / işlem görmemiş diskte olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan borlanmış çift değişmeyen 0,9 sürtünme katsayısı değeri göstermektedir. Ancak borlanmamış numunelerde sürtünme katsayısının artan bir eğilim içerisinde olduğu görülmektedir, diğer taraftan borlanmış numuneler stabil bir sürtünme katsayısı değeri erişmiştir. Genel olarak, daha uzun deneyler yapılarak sürtünme katsayısı ölçümlerinin yapılması daha sağlıklı karşılaştırma yapılmasını sağlayacaktır. Aşınma karakteristiğinin ayrıntılı incelenmesi için aşınan yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Şekil 4.29-a' da görüldüğü üzere borlanmış pine karşı borlanmış diskte bir aşınma meydana gelmemiş olup aşınma izi çok belirgin değildir. Şekil 4.29-b de verilen borlanmış pine karşı çalışan işlem görmemiş diskin aşınma izinden de anlaşılacağı üzere abrazif aşınma çelik diskte meydana gelmiştir. Borlanmış pin yüzeyi daha sert olduğu (1600HV) için yumuşak işlem görmemiş AISI 8620 çeliğini (300HV) aşındırmıştır. İşlem görmemiş AISI 8620 çelik pinin, AISI 8620 çelik diske karşı çalıştığı durumda aşınma daha ciddi boyuta meydana gelmiş olup aşınma izinin genişliği yaklaşık 2mm'ye ulaşmıştır. Aşınma izinin içerisinde ciddi boyutta aşınmaya bağlı malzeme kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.29-c).



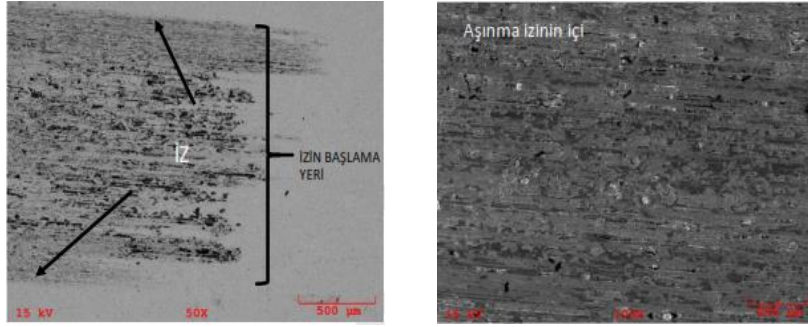
Şekil 4.27: Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma testi sonucu 2 ve 3 boyutlu profilleri. [75 rpm, 5 N, 60 dk]



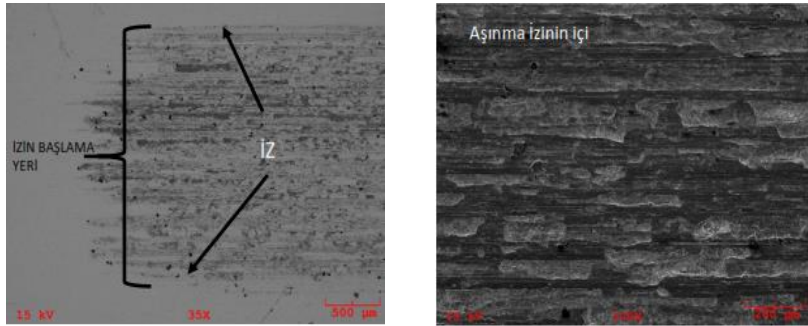
Şekil 4.28: Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin sürtünme katsayısı değişimleri [75 rpm, 5 N, 60 dk]



(a) Borlanmış Pin - Borlanmış Diske Karşı



(b) Borlanmış Pin - İşlem Görmemiş Diske Karşı

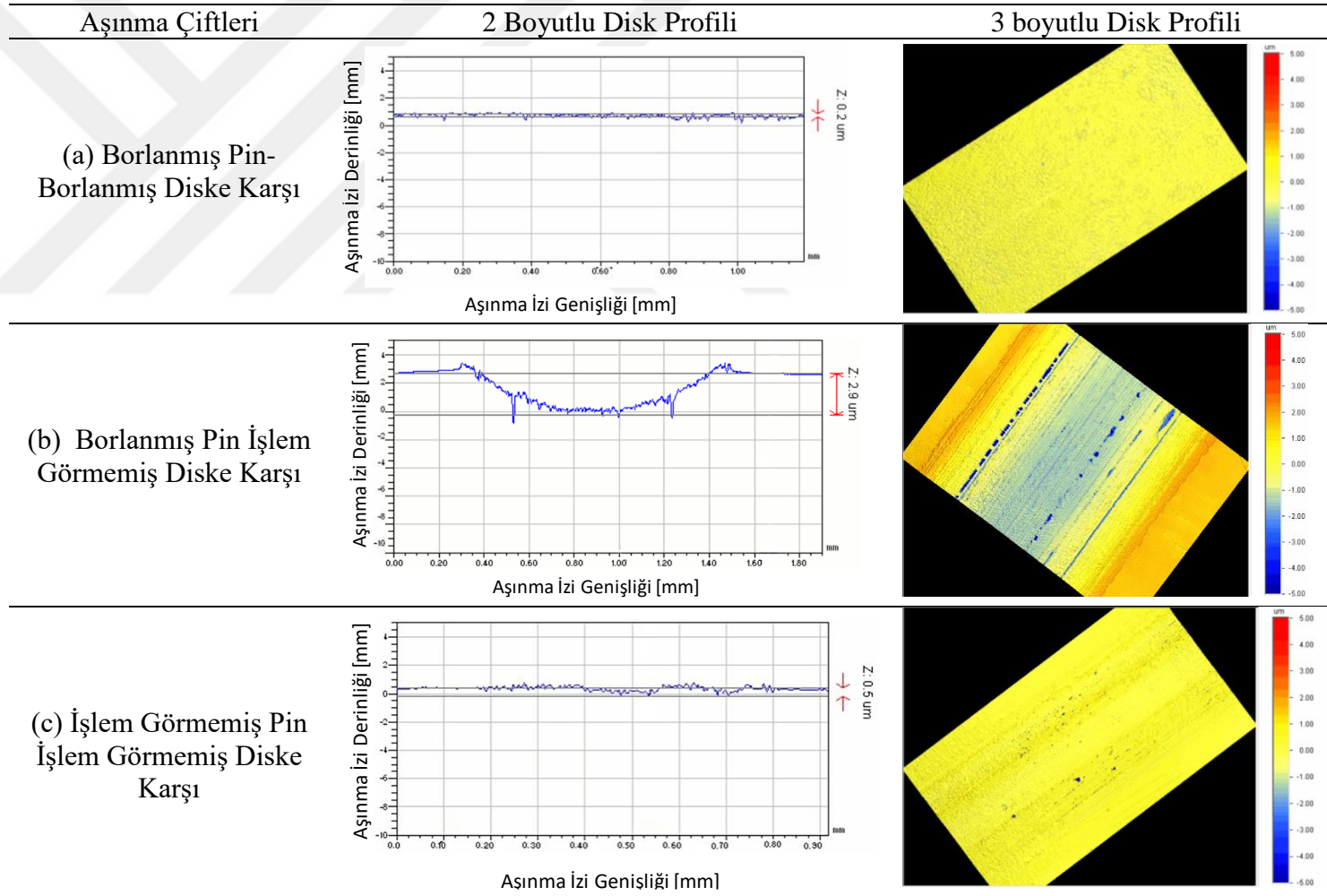


(c) İşlem Görmemiş Pin- İşlem Görmemiş Diske Karşı

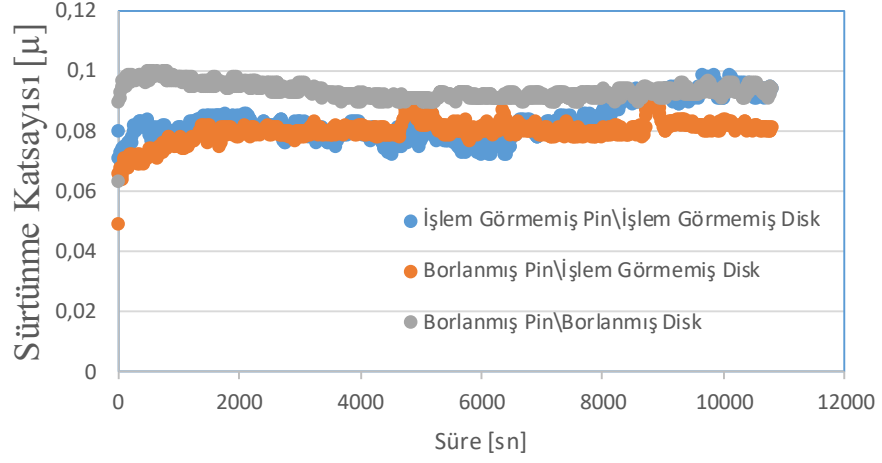
Şekil 4.29: Kuru ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma izlerinin ayrıntılı SEM incelemesi [75 rpm, 5 N, 60 dk]

Yağlı ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri, 50 N yük uygulanarak, 25 rpm hızında 3 saat süre ile 80 °C'de gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcı olarak, ticari şanzıman yağı kullanılmıştır. Deneylelerden sonra disklerin aşınan yüzeylerin iki ve üç boyutlu profillerine ait ölçümler Şekil 4.30'da verilmiştir. 2 ve 3 boyutlu disk profilleri incelendiğinde, borlanma işleminin yağlı koşullarda da AISI 8620 çeliğinin aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir. Kuru deneylelerde olduğu gibi en az aşınma borlanmış disk ve borlanmış pinde gözlenmiş olup, disk yüzeyinde ki en derin aşınma izi 0,2 µm'dir (Şekil 4.30-a). Kuru ortamda gerçekleştirilen deneylelerin aksine, en çok aşınma borlanmış pin işlem görmemiş disk çifti (Şekil 4.30-b) arasında meydana gelmiş olup disk yüzeyinde ki maksimum aşınma derinliği 2,9 µm'dir. Bu durumun nedeni, kuru ortamda işlem görmemiş pin/disk çifti yüzeylerinin her ikisinden birden aşınmaya bağlı olarak parçacıklar kopmakta ve aşınma yüzeyinde kalarak aşındırıcı görevi görmektedirler. Ancak yağlı ortamda borlanmış pin işlem görmemiş çelik çifti aşınırken, borlanmış pinin yüzeyi daha sert olduğundan, pin/disk çiftlerinden, kuru ortama göre daha az parçacık kopmakta ve kopan parçacıklar yağ ile birlikte ortamdaki uzaklaşmaktadır. En derin aşınma profili, borlanmış pin işlem görmemiş disk çifti arasında görülmüştür.

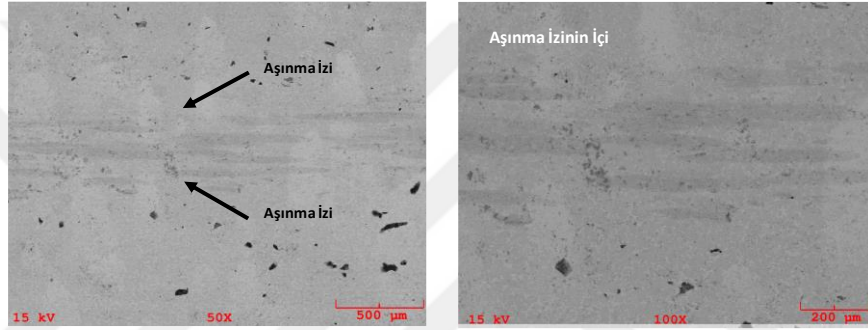
İlave olarak zaman bağlı sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir. Yağlı ortamda aşınma testi esnasında en yüksek sürtünme katsayıları 0,1 ile işlem görmemiş pin/disk çifti ve borlanmış pin/disk çiftinde görülmüş iken, borlanmış pin/işlem görmemiş disk arasında 0,06 olarak ölçülmüştür. Aşınma testinin yaklaşık 90. dakikasından sonra tüm pin/disk çiftleri arasında ki sürtünme katsayısı yaklaşık 0,08-0,09 mertebesine gelmiştir. Yağlı ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucu aşınan disklerin ayrıntılı karakteristik incelemesine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.32'de verilmiştir. Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testinde de olduğu gibi borlanmış pine karşı borlanmış disk yüzeyinde aşınma meydana gelmemiş olup, belirgin olmayan izler mevcuttur (Şekil 4.32-a). Borlama işlemi ile beraber AISI 8620 çelik malzemenin yüzeyinde borür tabakası büyütülerek, çelikten yaklaşık 5 kat daha sert bir yüzey elde edilmiş olup, borür tabakasının aşınmaya dayanıklı yapısı sayesinde AISI 8620 çelik malzemenin aşınma direnci artırılmıştır. Beklenen bu sonuç daha önce yapılan çalışmalar [26,38,40-44] ile paraleldir.



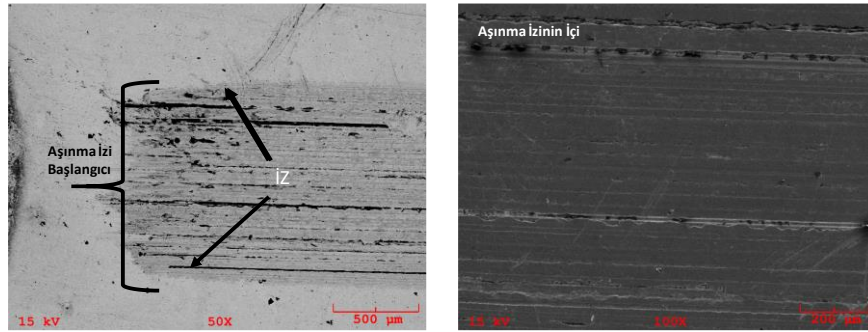
Şekil 4.30: Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma testi sonucu 2 ve 3 boyutlu profilleri [25 rpm, 50 N, 3 saat, 80 °C]



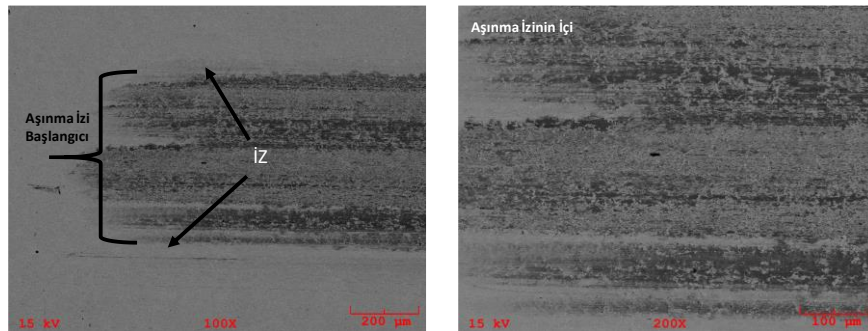
Şekil 4.31: Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin sürtünme katsayısı değişimleri [25 rpm, 50 N, 3 saat, 80 °C



(a) Borlanmış Pin - Borlanmış Diske Karşı



(b) Borlanmış Pin – İşlem Görmemiş Diske Karşı



(c) İşlem Görmemiş Pin- İşlem Görmemiş Diske Karşı

Şekil 4.32 Yağlı ortamda farklı işlemler görmüş pinlere karşı farklı işlemler görmüş taban malzemelerinin aşınma izlerinin ayrıntılı SEM incelemesi [75 rpm, 5 N, 60 dk]



5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, AISI 8620 vites dişli çeliği taban malzemesi üzerinde KRTD-Bor yöntemi ile tek fazlı Fe₂B borür tabakası büyütülmüş, akım yoğunluğunun, elektroliz süresinin, elektroliz sıcaklığının ve faz homojenleştirme süresinin büyütülen borür tabakasının, kalınlığına, kimyasına ve morfolojisine olan etkiler incelenmiştir. İdealize edilen koşullarda büyütülen borür tabakasının aşınma özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde kısaca belirtilmektedir.

1. 950 °C sıcaklıkta, 15 dk elektroliz süresinde, uygulanan düşük akım yoğunluğunda (50 mA/cm²) demir hemiborür (Fe₂B) fazının yanında yüzeyde demir oksit fazlarının da (Fe₂O₃ ve Fe₃O₄) oluştuğu tespit edilmiştir.
2. 950 °C' de, 15 dk elektroliz süresinde, 100 mA/cm² ve üzerindeki uygulanan akım yoğunlarında üretilen borür tabakalarında oksit oluşumu ortadan kalkmış ve iki fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakasının oluştuğu belirlenmiştir.
3. 950 °C' de, 15 dk elektroliz süresinde uygulanan her akım yoğunluğunda (50 mA/cm² - 400 mA/cm²) taban malzemeyi homojen olarak saran borür tabakası büyütülmüştür.
4. Artan akım yoğunluğuna bağlı olarak FeB ve Fe₂B tabakalarının kalınlığında artış olduğu belirlenmiştir. 950 °C' de, 15 dk elektroliz süresinde 50 mA/cm² de elde edilen ortalama 27 µm toplam tabaka kalınlığı 400 mA/cm² yaklaşık olarak 55 µm kalınlığa yükselmiştir. Toplam borür tabakası ve FeB tabakası kalınlığının büyüme hızı artan akım yoğunluğu birlikte azalarak parabolik bir artış göstermiştir.
5. Daha kalın borür tabakası büyütülmesine neden olduğu ve daha yüksek akım yoğunluğu değerine (400 mA/cm²) göre daha ince ve daha az homojen FeB tabakası büyütülmesine neden olmasından ve enerji optimizasyonu açısından 200 mA/cm² akım yoğunluğu ideal değer olarak alınmıştır.

6. 950 °C sıcaklıkta, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda uygulanan her elektroliz süresinde (15 dk-120dk) iki fazlı borür tabakasının (FeB ve Fe₂B) büyütüldüğü ve borür tabakasının çelik taban malzemeyi homojen olarak kapladığı tespit edilmiştir.
7. 950 °C sıcaklıkta, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 60 dk ve 90 dk elektroliz uygulanan numunelerin yüzeyinde demir borür fazlarının yanında elementel bor oluştuğu tespit edilmiştir.
8. 950 °C' de, 200mA/cm² akım yoğunluğunda, 15 dk elektroliz neticesinde ortalama toplam tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 50 µm olduğu belirlenmiştir. Süre arttıkça borür tabakasının kalınlığı artmakta olduğu ve 2 saat elektroliz neticesinde toplam borür tabakası kalınlığının 160 µm' ye kadar arttığı belirlenmiştir.
9. Artan süreye bağlı olarak, FeB tabakası borür tabakası içerisinde daha kalın ve belirgin hale gelmiştir. 950 °C' de, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda, 2 saat elektroliz neticesinde, FeB kalınlığı 115 µm'ye ulaşmıştır.
10. 200mA/cm² akım yoğunluğunda, 15 dk elektroliz süresinde, uygulanan her elektroliz sıcaklığında (950 °C, 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C) iki fazlı borür tabakalarının (FeB ve Fe₂B) büyütüldüğü belirlenmiştir.
11. Artan elektroliz sıcaklığı, toplam borür tabakası kalınlığının artmasına neden olmuştur 950 °C' de, 15 dk yapılan elektroliz neticesinde yaklaşık olarak 50 µm borür tabakası büyütülürken; 1100°C' de 80 µm büyütülmüştür.. Ancak FeB tabakasının kalınlığı 1000 °C den sonra azalma gösterdiği tespit edilmiştir.
12. Tek fazlı Fe₂B bileşiminde borür tabakasının AISI 8620 çeliği yüzeyinde büyütme amaçlı FH işlemi uygulanmıştır. 950 °C ve 1000 °C uygulanan FH işlemleri sırasında FeB tabakası kalınlığı azalırken, toplam borür tabakası kalınlığının arttığı belirlenmiştir.
13. 950 °C' de ve 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz ve ilave 80 dk FH işlemi neticesinde, çelik taban malzemeyi saran, oldukça homojen, yaklaşık 115 µm kalınlıkta, Fe₂B bileşiminde ve taban malzeme ile mükemmel kalite yapışma (HF 1) gösteren borür tabakası büyütülmüştür.

14. 950 °C' de ve 200mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz + 70 dk FH ve 15 dk elektroliz + 75 dk FH işlemleri neticesinde, AISI 8620 çeliği yüzeyinde büyütülen borür tabakaları kabul edilebilir düzeyde (HF3 ve üzeri) yapışma özelliği göstermişlerdir.
15. 1000 °C sıcaklıkta, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz işlemi ve ilave 45 dk FH işlemi sonucunda; AISI 8620 çelik yüzeyde yaklaşık 100 µm kalınlıkta, tek fazlı Fe₂B bileşiminde borür tabakası büyütülmüştür.
16. 1000 °C sıcaklıkta, 200 mA/cm² akım yoğunluğunda 15 dk elektroliz ve ilave 45 dk FH uygulanan çelik taban malzeme üzerinde oldukça homojen bir sertlik dağılımına sahip borür tabakası büyütülmüştür. Yüzeyden çelik mastrise doğru olan 75 µm bölgede ortalama 1600±100HV sertlik değeri ölçülmüştür. Bu borür tabakası aynı zamanda AISI 8620 çelik tabana mükemmel derecede iyi (HF 1) yapışma özelliği göstermiştir.
17. Büyütülen tek fazlı borür tabakasının aşınma özelliğini incelemek için kuru ve yağlı ortamda aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Her iki ortamda da gerçekleştirilen aşınma testlerinde, borlanmış pine karşı borlanmış disk üzerinde belirgin bir aşınma izine rastlanmamıştır.
18. KRTD-Bor yöntemi ile AISI 8620 çelik taban malzemenin üzerinde çok iyi derece yapışma özelliği gösteren, endüstriyel olarak talep edilen, çelik yüzeyinden yaklaşık 5 kart sert homojen Fe₂B borür tabakası büyütülmüş ve yüzeyde büyütülen borür tabakası ile birlikte çeliğin aşınma direnci artırılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] **Kartal, G.** (2012). *Katodik redüksiyon termal difüzyon yöntemi ile metallerin borlanması (KRTD-Bor)*. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul
- [2] **A Brief History of Gears.** (1999). *Gear Technology*, p. 64.
- [3] **Radzevich, S. P.** (2012). *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture* (2 ed.). CRC Press.
- [4] **Davis, J. R.** (2005). *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. USA: ASM International.
- [5] **Ribbens, W.** (2017). *Understanding Automotive Electronics: An Engineering Perspective*. USA: Butterworth-Heinemann .
- [6] http://sdp-si.com/resources/gears/pdf/gear_types_manufacturing.pdf
Erişim tarihi: 26.03.2017
- [7] **Naunheimer, H., Bertsche, B., Ryborz, J., & Novak, W.** (2011). *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [8] <http://www.otomoto.com.au/p/6036188/nissan-skyline-gt-r-os-88-6-speed-sequential-gearbox-by-os-giken.html> Erişim tarihi 26.03.2017.
- [9] **Norton, R. L.** (1999). *Design of Machinery : an introduction to the synthesis of mechanisms and machines*. Boston: McGraw-Hill.
- [10] **Shigley, J. E., & Mischke, C. R.** (1996). *Standard Handbook of Machine Design* (2. ed.). New York: McGraw-Hill.
- [11] **Rexnord Industries.** (1978, August). *Failure analysis:gears-shafts-bearings-seals*.
https://www.rexnord.com/ContentItems/TechLibrary/Documents/108-010_Failure-Analysis-Gears,-Shafts,-Bearings, Erişim Tarihi: 20 Mart 2018
- [12] **American Gear Manufacturers Assosication.** (2004). *Mechanisms of Gear Tooth Failures*. Virginia: AGMA.
- [13] **Stachowiak, G. W.** (2006). *Wear:Materials, Mechanisms and Practice*. (S. Gwidon W., ed.) John Wiley & Sons.
- [14] **Finger, S., & Dixon, J. R.** (1989). A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part II Representations, Analysis, and Design for the Life Cycle. *Research in Engineering Design*, 1(2), 121-137.
- [15] **Kızılaslan, K., İşel, B., & Yavuz, İ.** (2010). Dişli çarklarda meydana gelen hasar türleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 119-129.

- [16] **Snidle, R. W., Evans, H. P., Alanou, M. P., & Holmes, M. J.** (2004). Understanding scuffing and micropitting of gears. *School of Engineering Cardiff University*. United Kingdom
- [17] **İşel, B.** (2007). Dişliler için yüzey yorulması test cihazı geliştirilmesi ve yağ sıcaklığının etkisinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [18] **Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W.** (2013). *Engineering Tribology* (4 e.). Butterworth-Heinemann.
- [19] **Ding, Y., & Rieger, N. F.** (2003). Spalling formation mechanisms for gears. *Wear*, 254(12), 1307-1317.
- [20] **Fernandes, P. J.** (1996). Tooth bending fatigue failures in gears. *Engineering Failure Analysis*, 3(3), 219-225.
- [21] **Lampman, S.** (1991). Introduction to surface hardening of steels. *ASM Handbook Vol4. Heat Treatment* (pp. 254-267). ASM International.
- [22] **Rakhit, A. K.** (2000). *Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers*. ASM International.
- [23] **Özsaraç, U., Yılmaz, R., Ekerer, F. A., & Uzun, H.** (2012). Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikro yapı değişimlerinin incelenmesi. *Metalurji Dergisi*. 127.
- [24] **Matuschka, A. G.** (1980). *Boronizing*. München: Wien:Hanser.
- [25] **Sinha, A. K.** (1991). Boriding (Boronizing) of Steels. *ASM Handbook vol 4 Heat treating* (pp. 437-447). USA: ASM International.
- [26] **Düzcükoğlu, H., Çalık, A., İmrek, H., & Karakaş, M. S.** (2010). Examination of pitting and wear in borided, carburized, and borocarbured AISI 8620 gears. *Tribology Transactions*, 53(4), 485-490.
- [27] **Ulukoy, A., Can, A. C., Ozmen, Y., & Tasgetiren, S.** (2015). Borocarburing of decarburized gears made from 21NiCrMo2 (AISI 8620) steel. *Journal of Materials: Design and Applications*, 229(3), 226-235.
- [28] **Kartal, G.** (2004). *Ergimiş tuz elektroliz yöntemiyle çeliklerin borlanması ve proses parametrelerinin optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [29] **Aypar, A.** (2010). *Elektrokimyasal yöntemle titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **Timur, S., Kartal, G., Eryılmaz, O. L., & Erdemir, A.** (2009). *USA Patent No. US8951402B2*.
- [31] **Yukin, G. I.** (1971). The mechanism of electroplating with boron. *Metal Science and Heat Treatment*, 13(8), 662-664.
- [32] **Tkachev, V. N., Grigorov, P. K., & Katkhanov, B. B.** (1975). Bath for electrolytic boriding. *Metal Science and Heat Treatment*, 17(4), 348-350.

- [33] **Kartal, G., Eryilmaz, O. L., Krumdick, G., Erdemir, A., & Timur, S.** (2011). Kinetics of electrochemical boriding of low carbon steel. *Applied Surface Science*, 257(15), 6928-6934.
- [34] **Kartal, G., Timur, S., & Arslan, C.** (2005). Effects of process current density and temperature on electrochemical boriding of steel in molten salts. *Journal of Electronic Materials*, 34(12), 1538-1542.
- [35] **Kartal, G., Timur, S., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A.** (2010). Influence of process duration on structure and chemistry of borided low carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 205(5), 1578-1583.
- [36] **Kartal, G., Timur, S., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A.** (2011). The growth of single Fe₂B phase on low carbon steel via phase homogenization in electrochemical boriding (PHEB). *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 2005-2011
- [37] **Ürgen, M. K., Kazmanli, K. M., Kartal, G., & Timur, S.** (2007). *Europe Patent No. EP2058418A1*.
- [38] **Gunes, I., Uygunoğlu, T., Ergen, A., Kısıkcılar, T., & Aksoy, E.** (2015). Investigation of wear behaviour of borided DIN 20 MoCr4 Steel. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2(1), 53-58.
- [39] **Gunes, I., Ulker, S., & Taktak, S.** (2011). Plasma paste boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C steels. *Materials and Design*, 32(4), 2380-2386.
- [40] **Calik, A., Duzgun, A., Ekinci, A. E., Karakas, S., & Ucar, N.** (2009). Comparison of hardness and wear behaviour of boronized and carburized AISI 8620 Steels. *Acta Physica Polonica A*, 116, 1029-1032.
- [41] **Yılmaz, E.** (2005). *Borla kaplanmış taşıt aktarma organlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Isparta.
- [42] **Gunes, İ.** (2013). Wear behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620 steel with borax and B₂O₃ paste mixtures. *Journal of Material Science Technology*, 29(7), 662-668.
- [44] **Soydan, Y., Köksal, S., & Demirer, A.** (2008). Sliding friction and wear behaviour of pack-boronized AISI 1050, 4140, and 8620 steels. *Tribology Transactions*, 51, 74-81.
- [45] **Tabur, M., Izciler, M., Gul, F., & Karacan, I.** (2009). Abrasive wear behaviour of boronized AISI 8620 steel. *Wear*, 226(11-12), 1106-1112.
- [46] **Ersöz, A.** (2008). *Elektrokimyasal Borlama ile Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- [47] **Şeşen, F. E.** (2015). *Çelik Yüzeylerinde Elektrokimyasal ve Termokimyasal Difüzyon Tabakası Oluşumuna ve Difüzyon Tabakalarının Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi*. Doktra Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- [48] **Bolat, Ç.** (2016). *Orta Karbonlu DIN CK45 Çeliğinin Elektrokimyasal Yöntemle Borlanması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

- [49] **Kartal, G.,** Timur, S., Urgan, M., & Erdemir, A. (2010). Electrochemical boriding of titanium for improved mechanical properties. *Surface & Coatings Technology*, 204, 3935-3039.
- [50] **Zhou, J., & Bai, P.** (2015). A review on the methods of preparation of elemental boron. *ASIA-PACIFIC Journal of Chemical Engineering*, 10, 325-338.



EKLER

EK A: Yapışma özelliği değerlendirme tablosu



EK-A

HF1



HF2



HF3



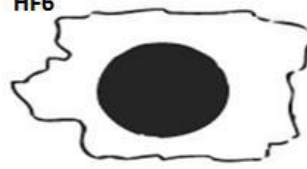
HF4



HF5



HF6



KOPMA

Şekil A.1: Daimler Benz Rockwell C testi değerlendirilmesi

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Alaaddin Cem OK
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.03.1992 MERSİN
E-posta : alaaddincem@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Uluslararası Tam Metinli Bildiri

Ok, A. C., Kartal Sireli G., Timur S. 2007. "Improving Service Performance Of Gear Steels Via Crtd-Bor", 10/2017, s. 244-246, International Materials Technologies and Metallurgy Conference 2017, İstanbul, 26.10.2017 - 27.10.2017 (*Poster*)